INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Análise do Comportamento de um Vaso de Alta Pressão a Temperatura Elevada

Projecto, Desenvolvimento, Produção e Ensaio de uma Célula de Investigação Química, de Alta Pressão e Alta Temperatura

Daniel dos Santos Carvalheira Franco Mendes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Prof. Nuno Manuel Mendes Maia
Orientador: Prof. António Manuel Relógio Ribeiro
Co-Orientador: -
Vogais: Prof. Manuel J. Moreira Freitas

Novembro de 2007

*À minha namorada **Vera**,*
porque foi no seu carinho, amor e incentivo incondicionais,
que encontrei força para nunca desistir;

*À minha família, **pai**, **mãe** e **irmã**,*
por sempre acreditarem em mim
e estarem sempre ao meu lado;

*Ao meu sobrinho **Martim**,*
pelo amor e carinho com
que sempre me brindou.

AGRADECIMENTOS

A satisfação de ver quase concluída mais uma etapa da vida, tão ambicionada, faz quase dissipar as inúmeras dificuldades sentidas e traz à tona a sensação de tudo ter valido a pena. Contudo, esta é certamente a altura indicada para ser feita uma retrospectiva do tempo em que todo este trabalho foi desenvolvido.

É quase impossível mencionar todas as pessoas que foram importantes na elaboração deste trabalho, no entanto, primeiro que tudo, gostaria de deixar uma nota de agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a minha formação, a todos os níveis, ao longo da minha vida, professores, família e amigos. Torna-se contudo imperativo, mencionar directamente aqueles que, durante o desenvolvimento deste trabalho, acompanharam os momentos mais ou menos alegres, que um trabalho desta envergadura envolve, e cuja ajuda e incentivo foram determinantes.

Não porque seja necessário, mas porque seria muito injusto se não o fizesse, deixo um agradecimento ao Prof. Manuel J. Moreira Freitas e um agradecimento especial ao meu Orientador Prof. António Manuel Relógio Ribeiro, não apenas pelo incentivo que sempre me deu, mas principalmente por ter acreditado em mim desde o primeiro dia e pela sua presença e disponibilidade incansáveis. A sua capacidade de visão, investigação e perseverança, serão para mim sempre um modelo de conduta a seguir. Para ele, a minha mais profunda gratidão e admiração.

Às instituições académica e empresarial que acolheram e financiaram o meu trabalho, o Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa e a Omnidea, Lda., quero manifestar o meu reconhecimento pelo apoio e condições que me disponibilizaram. Um agradecimento especial ao Eng. Tiago Pardal (Omnidea, Lda.) por toda a confiança, credibilidade e amizade depositadas em mim e aos meus colegas e amigos da Omnidea, pelo apoio e disponibilidade que sempre mostraram.

À minha futura esposa, devo uma palavra de carinho e admiração, uma vez que ao longo de todo este tempo, foi ela o pilar que sustentou e suportou as repercussões de todos o momentos vividos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, vale a pena renovar toda a minha gratidão, pelo carinho e apoio incondicional que sempre me deram. A eles, devo a pessoa que hoje sou.

Por último, mas não menos importantes, deixo um agradecimento a todos os meus amigos do coração, em especial ao Sandro Oliveira, ao Frederico Carvalho e à Inês Carvalho, pela amizade, companheirismo e bom humor, que me ajudaram a ultrapassar os momentos menos bons que foram surgindo no decorrer deste trabalho, bem como, celebraram comigo os momentos mais positivos.

RESUMO

O projecto, desenvolvimento, construção e ensaio de uma célula de investigação electroquímica de alta pressão e alta temperatura, pode revelar-se uma tarefa bastante complexa, no que respeita às condições e limitações envolvidas e pretendidas na concepção de um reactor deste género (pressão, temperatura, corrente eléctrica, meios extremos ácidos/base, interfaces de monitorização, duas câmaras, risco de contaminação do material devido aos reagentes, e vice-versa).

Tendo em conta a versatilidade pretendida no reactor, um dos objectivos deste trabalho visou uma pesquisa sobre os conceitos de reactores mais recentes e em desenvolvimento e um estudo exaustivo dos materiais existentes no mercado, por forma a colmatar todos os obstáculos que tal versatilidade impõe e por forma ultrapassar todos os problemas que surgiram, a nível construtivo.

Seguidamente, para além de ter sido desenvolvido todo o conceito, foi elaborado o projecto e dimensionamento de todos os componentes que constituem o reactor, bem como, a análise da estrutura externa que o constitui. Essa análise estrutural foi efectuada analítica, computacional e experimentalmente (esta, após a produção do reactor), de modo a, posteriormente, confrontar todos os resultados e tirar as ilações necessárias a nível da validade ou coerência dos próprios métodos. Tiveram também lugar neste trabalho, para além da produção do reactor, os testes de segurança do mesmo, tendo como base o código europeu em vigor.

Como conclusão, os resultados obtidos através dos três métodos mostraram uma grande consistência entre eles e os mesmos foram comprovados, para além do que, foi garantida a segurança, fiabilidade e funcionalidade do reactor.

Palavras-Chave – Célula, Química, Investigação, Alta, Pressão, Temperatura

ABSTRACT

The project, development, production and experimental rehearsal of a high pressure and high temperature electrochemical research vessel, can reveal itself, a very complex task, due to all the conditions involved in the conception of this kind of vessel (pressure, temperature, electric current, extreme alkali/acid environments, measurement devices, the existence of two internal chambers, material contamination risk due to the reagents and vice-versa).

Whereas the reactor's desired versatility, the first target for this project was to make a research of the most recent vessels and a research of the materials to use in this reactor, in order to overrun the barriers which such versatility demands, as well as, some of the construction problems that followed.

Secondly, beyond the developed concept, it was made the dimensioning project for all the reactor's components, as well as the external structure analysis which was made analytically, computationally and experimentally (this one made after the reactor's construction) in order to make a comparison between those three results and raise the main conclusions which are to be taken in matters of validity and consistency of those methods. Furthermore, security issues and tests also took place, having in consideration the European code into force.

Confronting the final results, it is to regard that they promote a consistent coherency between the three used methods in the vessel's study and development. Furthermore, these facts alongside with the security tests, the security, reliability and functionality of the vessel were secured.

Keywords: Vessel, Chemistry, Research, High, Pressure, Temperature

ÍNDICE

Agradecimentos ..... **i**

Resumo ..... **ii**

Abstract ..... **iii**

Índice ..... **iv**

Lista de Quadros ..... **vi**

Lista de Figuras ..... **vii**

Lista de Abreviaturas ..... **ix**

1. Introdução **1**

1.1. Motivação e Objectivos 1
1.2. Estrutura da Dissertação 2
1.3. Revisão Bibliográfica 3
1.3.1. Factos, Princípios e Métodos 3
1.3.2. Reservatórios de Pressão 17
1.3.3. Tensões Térmicas 23

2. Projecto e Desenvolvimento **25**

2.1. Introdução 25
2.2. Condições e Limitações 26
2.3. Conceitos Estudados 28
2.4. Materiais e Componentes 37

3. Análise de Comportamento: Método Analítico **40**

3.1. Introdução 40
3.2. Método Analítico 40
3.2.1. Projecto de Ligações Aparafusadas 41
3.2.2. Projecto de Ligações Soldadas 46
3.3. Estudo Analítico do Vaso 49
3.3.1. Projecto do Cilindro 52
3.3.2. Projecto das Tampas 55
3.4. Conclusões Gerais do Estudo Analítico 56

4. Análise de Comportamento: Método Computacional **57**

4.1. Introdução 57
4.2. Método Computacional 57
4.3. Estudo Computacional do Vaso 58
4.4. Conclusões Gerais do Estudo Computacional 66

5. Análise de Comportamento: Método Experimental **67**

5.1. Introdução 67
5.2. Método Experimental 67
5.3. Estudo Experimental do Vaso 70
5.4. Conclusões Gerais do Estudo Experimental 72

6. Discussão de Resultados **74**

6.1. Introdução 74
6.2. Comparação dos Resultados Obtidos nos Métodos Estudados 74
6.3. Conceito Final 76

7. Conclusões e Sugestões 78

7.1. Conclusões 78
7.2. Sugestões 79

Referências Bibliográficas 81

A. Materiais e Fornecedores 86

A.1. Especificação dos Materiais e Instrumentos Utilizados 86
A.1.1. Aço Inoxidável Classe 316L 86
A.1.2. Macor® 87
A.1.3. Parafusos *NPT*, Ligações de Portas e Válvulas 88
A.1.4. Manómetros 90
A.1.5. Superwool 607 91
A.2. Fornecimento 91
A.2.1. Aço Inoxidável Classe 316L 91
A.2.2. Macor® e Superwool 607 92
A.2.3. Parafusos 92
A.2.4. Vidro 93
A.2.5. Interfaces 93
A.2.6. Extensometria 94

B. Produção 95

B.1. Desenhos Técnicos 95
B.2. Processo de Produção 96
B.4. Manual de Utilização e Manutenção 107

C. Ensaios Laboratoriais 108

LISTA DE QUADROS

Tabela 2-1 – Condições Preliminares de Projecto. 26
Tabela 2-2 – Condições de Projecto Pretendidas. 27
Tabela 2-3 – Condições Finais de Projecto. 28
Tabela 2-4 – Descriminação dos Materiais e Componentes Utilizados. 39
Tabela 3-1 – Esforço Normal e Carga de Pré-Tensão. 42
Tabela 3-2 – Dimensões dos Parafusos. 42
Tabela 3-3 – Propriedades do Aço Inoxidável 316L. 51
Tabela 4-1 – Valores das Tensões nos Pontos Estudados na Parte Lateral. 63
Tabela 4-2 – Valores das Tensões nos Pontos Estudados, nas Tampas. 64
Tabela 5-1 – Parâmetros geométricos e eléctricos dos extensómetros. 68
Tabela 5-2 – Resultados Experimentais das Extensões na Tampa Inferior. 70
Tabela 5-3 –Resultados Experimentais das Extensões na Zona Cilíndrica. 71
Tabela 5-4 – Resultados Experimentais das Tensões e Direcções Principais. 71
Tabela 5-5 – Resultados Experimentais Médios. 71
Tabela 6-1 – Valores Obtidos no Estudo Comparativo. 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estruturação da dissertação por capítulos. 2
Figura 1.2 – (*a*) Corpo generalizado; (*b*) Corpo generalizado cortado aleatoriamente na superfícies que contém o ponto *Q*. 4
Figura 1.3 – Orientações da força concerntrada, na área infinitesimal ΔA_x . 4
Figura 1.4 – Componentes da Tensão. 5
Figura 1.5 – Tensões em três superfícies diferentes, perpendiculares. 6
Figura 1.6 – Deformação atribuida a σ_x . 7
Figura 1.7 – Deformação de corte. 8
Figura 1.8 – Formas de extensómetros de resistência eléctrica. 15
Figura 1.9 – Exemplos de configurações comuns de extensómetros 16
Figura 1.10 – Extensómetro rectangular em roseta, de três elementos. 16
Figura 1.11 – Definições pertencentes a cascas de revolução. 17
Figura 1.12 – Tensões resultantes (normal e de corte), tensões combinadas devido à flexão e torsão num elemento infinitesimal de uma casca axissimétrica sujeita a uma carga generalizada P_Φ, P_θ e P_R. 18
Figura 1.13 – Gráficos da evolução de σ_θ e σ_r , com o aumento de *r*. 21
Figura 2.1 – Tabelas de *Pugsley* para Determinação do Factor de Segurança. 26
Figura 2.2 – Primeiro conceito para o reactor. 29
Figura 2.3 – Segundo conceito para o reactor. 30
Figura 2.4 – Terceiro conceito para o reactor. 31
Figura 2.5 – Pormenor da câmara interna no terceiro conceito. 32
Figura 2.6 – Quarto conceito para o reactor. 33
Figura 2.7 – Pormenor da câmara interna no quarto conceito. 34
Figura 2.8 – Pormenor das ligações utilizadas no quarto conceito. 35
Figura 2.9 – Quinto conceito para o reactor. 36
Figura 2.10 – Pormenor da câmara interna no quinto conceito. 36
Figura 2.11 – Pormenor das ligações eléctricas utilizadas no quinto conceito. 37
Figura 3.1 – Tabelas das dimensões e áreas resistantes para parafusos métricos e classe de resistência para parafusos de aço. 42
Figura 3.2 – Troços do cone de pressão. 43
Figura 3.3 – Esquematização da força envolvida. 46
Figura 3.4 – Geometria de soldaduras e parâmetros usados tendo vários tipos de cargas. 47
Figura 3.5 – Esquematização das dimensões do cordão de soldadura. 48
Figura 3.6 – Configuração da tensão normal, na zona do cordão. 48
Figura 3.7 – Dimensões da câmara interna. 50

Figura 3.8 – Vista em corte das dimensões internas do copo de vidro que envolve a câmara externa. 50
Figura 3.9 – Evolução das tensões de cedência e de rotura do aço 316L, com a temperatura..... 51
Figura 3.10 – Dimensão necessária para o chanfro de soldadura entre o cilindro e a aba. 53
Figura 3.11 – Dimensão necessária para a calha que acomoda o vedante. 53
Figura 3.12 – Círculo de *Mohr* referente ao estado de tensão do cilindro. 54
Figura 4.1 – Esquematização do elemento *Plane82*. 58
Figura 4.2 – Modelação do perfil do vaso de pressão. 60
Figura 4.3 – Malha final adoptada para a análise computacional do reactor. 60
Figura 4.4 – Estado de tensões (tensão equivalente de *Von Mises*) do perfil do reactor. 61
Figura 4.5 – Pormenor dos pontos onde se verificou concentração de tensões. 62
Figura 4.6 – Detalhe da tensão equivalente no cilindro. 63
Figura 4.7 – Círculo de *Mohr* referente ao estado de tensão do ponto 1, do cilindro. 64
Figura 4.8 – Detalhe da tensão equivalente no centro das tampas (inferior e superior, respectivamente, visto da esquerda para a direita). 64
Figura 4.9 – Deformada e valores das deformações da estrutura do vaso. 65
Figura 4.10 – Comparação entre as deformações radial e axial. 65
Figura 5.1 – Esquematização da geometria dos extensómetros 1-RC11-4/350 da HBM. 67
Figura 5.2 – Correspondência das extensões a cada uma das grelhas de medição. 68
Figura 5.3 – Gráfico da evolução das tensões ao longo dos ensaios realizados, na tampa inferior. 72
Figura 5.4 - Gráfico da evolução das tensões ao longo dos ensaios realizados, na zona cilíndrica 72
Figura 6.1 – Gráficos comparativos dos resultados dos obtidos no estudo paralelo. 76
Figura 6.2 – Conceito final produzido e testado do reactor de alta pressão e alta temperatura. 77

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Designação
MEF	Método dos Elementos Finitos
AISI	American Iron and Steel Institute
REAE	Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Objectivos

"*After climbing one hill, one only finds that there are many more hills to climb.*"
Nelson Mandela

A motivação principal que presidiu à elaboração do trabalho apresentado nesta dissertação, prende-se com a conjugação entre vários factores muitas vezes incompatíveis, devido a dificuldades físicas, encargos económicos pouco sustentáveis, tecnologias ainda não disponíveis ou muito pouco divulgadas, bem como, limitações a nível das propriedades dos próprios materiais e ao seu fornecimento. Esses factores incluem a presença de alta pressão, alta temperatura, corrente eléctrica (com o intuito de alimentar electricamente, tanto os eléctrodos presentes na célula, como o próprio sistema de aquecimento da mesma), ambientes desfavoráveis à integridade dos materiais, para além do compromisso para a obtenção de um mecanismo com uma versatilidade bastante aceitável, de forma a possibilitar uma vasta gama de operações e experiências.

No decorrer desta dissertação, será possível verificar que, as dificuldades e obstáculos a ultrapassar foram muitos, associados às exigências base para o desenvolvimento desta célula de investigação, a problemas construtivos, à escassez de alternativas, às propriedades dos materiais disponíveis para a efectiva produção da célula, às limitações a nível do fornecimento desses mesmos materiais e, obviamente, associados à inovação inerente nos objectivos pretendidos.

Um dos objectivos deste trabalho passa, portanto, por resolver os vários problemas construtivos associados a ele, a nível de dimensionamento da célula, de inserção de todos os componentes cuja sua presença é exigida à partida, de assemblagem e funcionalidade da própria célula e dos factores de segurança a ela associados. Para tal, foram estudados a nível construtivo e funcional vários conceitos, que foram sofrendo um desenvolvimento e uma evolução natural devido aos constrangimentos e limitações acima mencionados, de forma a chegar-se a um conceito final que cumprisse com os objectivos pretendidos.

Outro objectivo a cumprir neste trabalho é o estudo analítico, computacional e experimental da estrutura externa que constitui o reactor e, posteriormente, comparar os resultados dos três métodos que estudam o comportamento mecânico dessa estrutura, com vista a analisar e comprovar a coerência entre os valores apresentados pelos mesmos, assim como, a estimar a consistência e veracidade dos resultados de cada um dos métodos, com a finalidade de garantir, tanto a segurança da própria estrutura do reactor (devido a riscos económicos), como a segurança do operador do mesmo (dados os sérios riscos de vidas humanas envolvidos, devido às pressões e temperaturas em causa).

Por fim, é importante referir algumas sugestões para possíveis melhorias a nível de concepção, a nível construtivo e a nível analítico, de forma a optimizar alguns aspectos inerentes neste estudo e neste projecto.

1.2. Estrutura da Dissertação

A dissertação está essencialmente dividida em 4 partes fundamentais: **Introdução**, que inclui os objectivos, a estrutura da dissertação e uma revisão bibliográfica, **Projecto e Desenvolvimento**, **Análise Comportamento** e, por fim, as **Conclusões** que inclui as conclusões propriamente ditas e as sugestões para melhorias. A figura 1.1 ilustra esta estruturação.

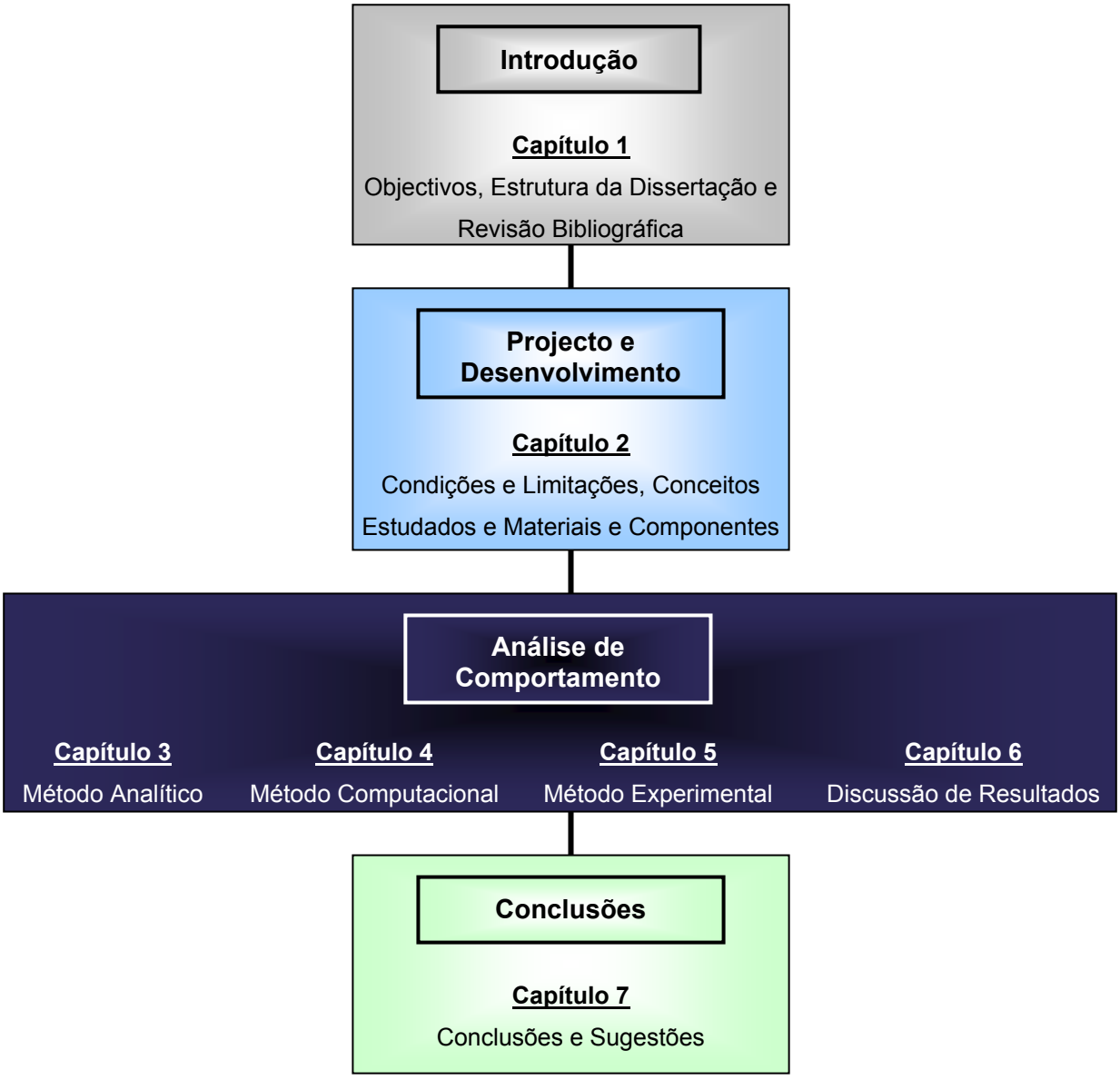


Figura 1.1 – Estruturação da dissertação por capítulos.

Introdução – Na primeira parte desta dissertação, constituída pelo Capítulo 1, apresentam-se as principais motivações e objectivos que estiveram na base do estudo desenvolvido. É aqui apresentada a revisão bibliográfica que incide sobre um vasto número de ferramentas necessárias e utilizadas no decorrer deste trabalho, bem como, alguns fundamentos e conceitos sobre reactores e vasos de pressão. A revisão será dividida em dois grupos (Reactores e Base Teórica), sendo que a Base Teórica será subdividida em vários subgrupos, cada um deles referente a cada componente sujeito a estudo, no reactor.

Projecto e Desenvolvimento – Na segunda parte da dissertação, constituída pelo Capítulo 2, será feita uma abordagem das condições e limitações envolvidas, no que diz respeito aos requisitos para o reactor e no que diz respeito às limitações com que esses mesmos requisitos se depararam durante a fase de projecto. Irá incluir também uma apresentação dos conceitos estudados e uma apresentação das características dos materiais e componentes utilizados na construção e assemblagem do reactor.

Análise de Comportamento – Após a pesquisa bibliográfica e do projecto e desenvolvimento, nos Capítulos 3, 4, 5 e 6 é realizado um estudo aprofundado da estrutura externa que constitui o reactor e que suporta todas a cargas envolvidas, entre o interior e o exterior do vaso. Os estudos efectuados têm por base:

- Método Analítico
- Método Computacional
- Método Experimental

onde, posteriormente, serão analisados e comparados os resultados numéricos dos três estudos efectuados, o que permite então retirar as ilações necessárias sobre a consistência dos resultados obtidos, tal como, a certeza e coerência dos mesmos.

Paralelamente, serão também demonstrados (analiticamente) os resultados obtidos para alguns dos componentes que constituem o reactor, nomeadamente, as ligações aparafusadas e a ligação soldada.

Conclusões – Por fim, no sétimo e último Capítulo, apresentam-se as conclusões, as contribuições inovadoras propostas no presente trabalho e ainda sugestões para melhorias do reactor projectado e estudado, a nível de *performance*, funcionalidade e segurança.

1.3. Revisão Bibliográfica

1.3.1. Factos, Princípios e Métodos

Tensão e Extensão: Relações Importantes

Entender as propriedades físicas da tensão e extensão é um pré-requisito para utilizar os mais variados métodos e resultados da análise estrutural, em projecto. Seguidamente serão mostradas as definições e relações importantes da tensão e da extensão.

Tensão

A tensão é simplesmente um força distribuída numa superfície interna ou externa de um corpo. Para obter uma ideia mais sólida, considere-se um corpo qualquer, carregado, como mostrado a Fig. 1.2(*a*). Sejam, respectivamente, P_i e p_i forças concentradas e forças distribuídas numa superfície. Para determinar o estado de tensão no ponto *Q* do corpo, é necessário expor a superfície que contém o ponto *Q*. A orientação deste corte é aleatória, mas, geralmente, este é feito num plano mais conveniente, em que o estado de tensões possa ser determinado facilmente ou onde determinadas relações geométricas possam ser aplicadas. O primeiro corte, ilustrado na Fig. 1.2(*b*), está orientado arbitrariamente pela superfície normal a *x*, o que dá origem ao plano *yz*. As forças externas no que resta do corpo estão indicadas, bem como a distribuição das forças internas (tensões) ao longo da superfície interna que contém *Q*. No caso geral, esta distribuição não é uniforme ao longo da superfície, nem será normal ou tangencial à mesma. Contudo, a distribuição de forças em *Q* terá componentes nas direcções normal e tangencial. Essas componentes serão tensões de tracção ou compressão e de corte, respectivamente.

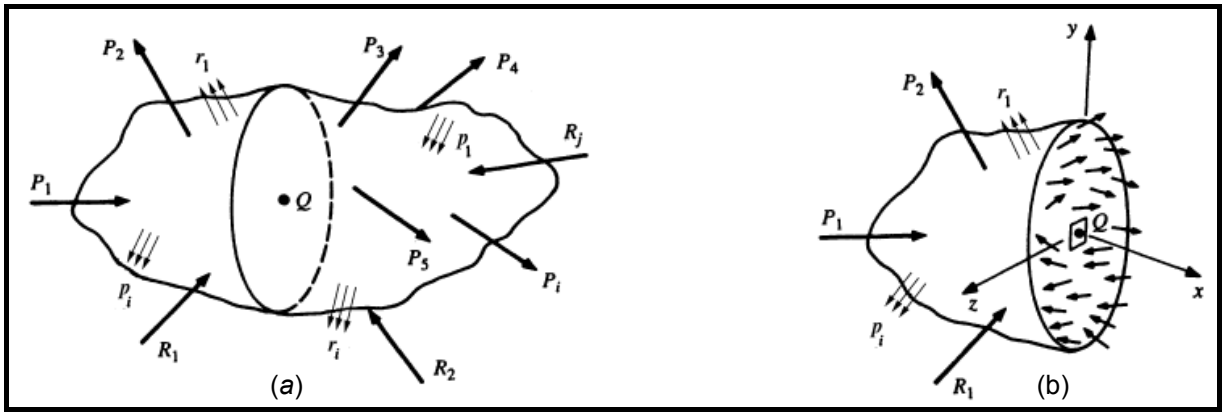


Figura 1.2 – (*a*) Corpo generalizado; (*b*) Corpo generalizado cortado aleatoriamente na superfícies que contém o ponto *Q*.

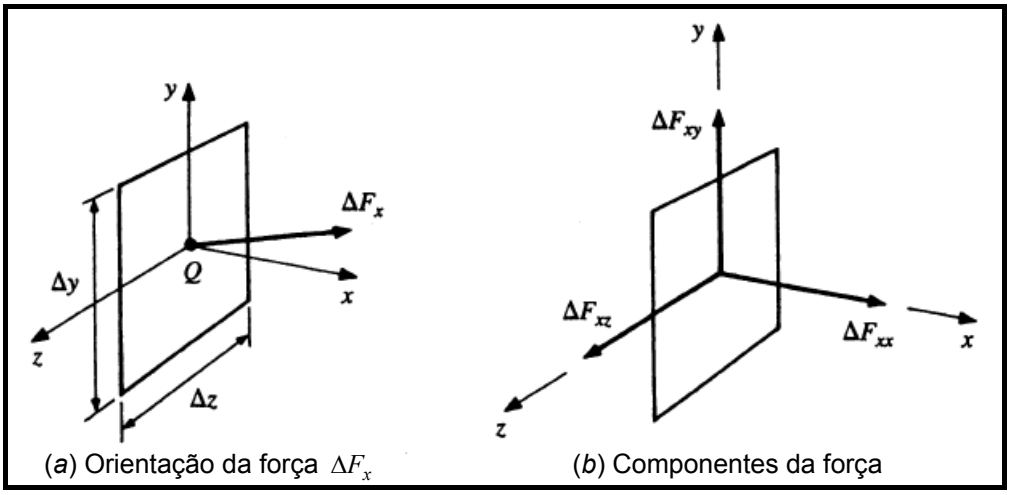


Figura 1.3 – Orientações da força concentrada, na área infinitesimal ΔA_x .

Seguindo um sistema de coordenadas obtido através da *regra da mão direita*, os eixos *y* e *z* são definidos perpendicularmente a *x* e tangenciais à superfície. Veja-se a área infinitesimal $\Delta A_x = \Delta y \Delta z$ em *Q*, como mostra a Fig. 1.3(*a*). A força concentrada equivalente devido à força distribuída nesta área, é ΔF_x, que, genericamente, não é normal nem tangencial à superfície. A força ΔF_x tem componentes nas direcções *x*, *y* e *z*, denominadas por ΔF_{xx}, ΔF_{xy} e ΔF_{xz}, respectivamente, como mostra a Fig. 1.3(*b*). Note-se que o primeiro subscrito refere-se à direcção normal à superfície e que o segundo refere-se à direcção da componente da força.

A força distribuída média por unidade de área (tensão média) na direcção *x*, é:

$$\overline{\sigma}_{xx} = \frac{\Delta F_{xx}}{\Delta A_x} \tag{1.1}$$

Considerando que a tensão é uma função pontual, obtém-se então a tensão exacta na direcção *x*, no ponto *Q*, pela aproximação de ΔA_x a zero. Portanto,

$$\sigma_{xx} = \lim_{\Delta A_x \to 0} \frac{\Delta F_{xx}}{\Delta A_x} = \frac{dF_{xx}}{dA} \tag{1.2}$$

Surgem também tensões a partir das forças tangenciais ΔF_{xy} e ΔF_{xz}, visto que estas forças são tangenciais, estas tensões denominam-se por tensões de corte. Portanto, de forma similar à Eq. (1.2);

$$\tau_{xy} = \frac{dF_{xy}}{dA_x} \tag{1.3}$$

$$\tau_{xz} = \frac{dF_{xz}}{dA_x} \tag{1.4}$$

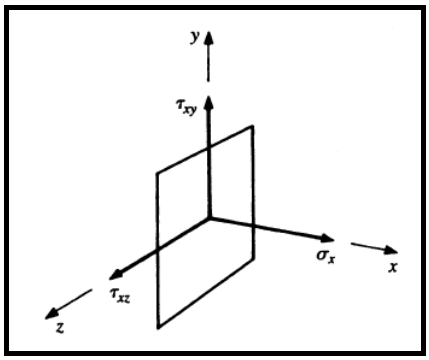


Figura 1.4 – Componentes da Tensão.

Dado que, por definição, *σ* representa a tensão normal que actua na mesma direcção da normal da superfície correspondente, subscritos duplos acabam por ser redundantes, logo, $\sigma_{xx} = \sigma_x$. As três tensões existentes na superfície exposta, no ponto *Q*, estão ilustradas na Fig. 1.4. Contudo, é importante verificar que, a seta indica a uma distribuição de forças (tensão) e não uma força concentrada. As tensões de corte τ_{xy} e τ_{xz} são as componentes da tensão de corte em toda a superfície, sendo esta dada por:

$$\tau_x = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2} \tag{1.5}$$

Para descrever o estado de tensões total no ponto *Q* completamente, seria necessário examinar outra superfícies, cortando o corpo noutras direcções. Mas visto que cortes noutras direcções iriam originar diferentes sistemas de coordenadas, bem como diferentes diagramas de corpo livre, as tensões em cada uma das novas superfícies seria bastante diferente. De facto, iriam existir infinitos estados de tensão. Portanto, seria necessário uma superfície esférica infinitesimal em volta do ponto *Q*, para obter o estado de tensões completo do ponto. Felizmente, através do método de transformação de coordenadas, é apenas necessário analisar três superfícies diferentes, para descrever completamente o estado de tensões num ponto. Essa três superfícies são, geralmente, seleccionadas de forma a que sejam perpendiculares entre si, como ilustrado na Fig. 1.5.

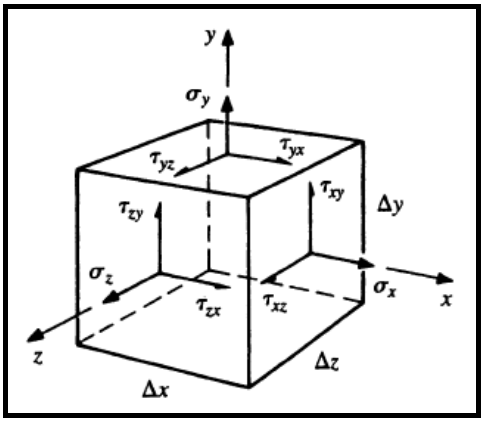


Figura 1.5 – Tensões em três superfícies diferentes, perpendiculares.

Este estado de tensão pode ser escrito em forma de matriz, onde a tensão $[\sigma]$, é dada por:

$$[\sigma]=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z\end{bmatrix} \tag{1.6}$$

Excepto em casos muito especiais, pode-se dizer que as tensões de corte adjacentes, são iguais, ou seja, $\tau_{yx}=\tau_{xy}$, $\tau_{zy}=\tau_{yz}$ e $\tau_{xz}=\tau_{zx}$ e o tensor das tensões é simétrico e dado por:

$$[\sigma]=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz}\\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z\end{bmatrix} \tag{1.7}$$

Tensão Plana – Existem muitos problemas práticos onde as tensões, numa direcção, são nulas. Esta situação é denominada por caso de *tensão plana*. Arbitrariamente, seleccionando a direcção *z* como sendo a que não está sujeita a tensão $\sigma_z=\tau_{xz}=\tau_{yz}=0$, as últimas fila e coluna do tensor são eliminadas e o tensor passa a ser escrito da seguinte forma:

$$[\sigma]=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy}\\ \tau_{xy} & \sigma_y\end{bmatrix} \tag{1.8}$$

Extensão e Relações de Tensão-Extensão

Tal como as tensões, existem dois tipos de extensões: extensão normal e extensão de corte (distorção), cuja nomenclatura é ε e γ, respectivamente. A extensão normal é q taxa de variação do comprimento do elemento sob tensão, numa direcção particular. A extensão de corte é q medida da distorção sofrida pelo material sob tensão.

Extensão Normal – Inicialmente, considere-se apenas uma tensão normal σ_x aplicada no elemento indicado na Fig. 1.6. É possível verificar que o elemento aumenta em comprimento na direcção *x* e que diminui em comprimento nas direcções *y* e *z*. A taxa dimensional em comprimento é definida como extensão normal, onde ε_x , ε_y e ε_z representam as extensões normais nas direcções *x*, *y* e *z*, respectivamente. Portanto, o novo comprimento e qualquer direcção é igual ao comprimento original, mais a taxa de aumento de comprimento, vezes o seu comprimento original, ou seja,

$$\Delta x' = \Delta x + \varepsilon_x \Delta x, \quad \Delta y' = \Delta y + \varepsilon_y \Delta y, \quad \Delta z' = \Delta z + \varepsilon_z \Delta z \tag{1.9}$$

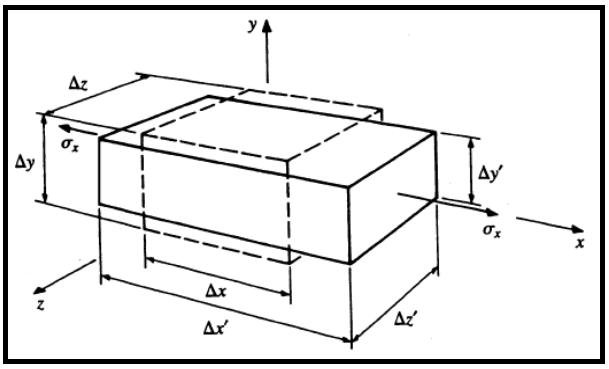


Figura 1.6 – Deformação atribuída a σ_x .

Existe uma relação directa entre a extensão e a tensão. A *Lei de Hooke* para um material linear, homogéneo e isotrópico diz simplesmente que, a extensão normal é directamente proporcional à tensão normal e é dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right] \tag{1.10a}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu\left(\sigma_x + \sigma_z\right)\right] \tag{1.10b}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right] \tag{1.10c}$$

Onde as constantes dos material *E* e *v*, são respectivamente o *módulo de elasticidade* (ou *módulo de Young*) e o *coeficiente de Poisson*. Caso as extensões nas Eqs. (1.10) sejam conhecidas, as tensões podem ser resolvidas simultaneamente para obter:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu\left(\varepsilon_y + \varepsilon_z\right)\right] \tag{1.11a}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_y + \nu\left(\varepsilon_x + \varepsilon_z\right)\right] \tag{1.11b}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)\right] \tag{1.11c}$$

Para o caso de *tensão plana*, com $\sigma_z = 0$, as Eqs. (1.10) e (1.11) ficam:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu\sigma_y\right) \tag{1.12a}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \nu\sigma_x\right) \tag{1.12b}$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}\left(\sigma_x - \sigma_y\right) \tag{1.12c}$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y\right) \tag{1.13a}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x\right) \tag{1.13b}$$

Extensão de Corte – A alteração de geometria num elemento, causada pelas tensões de corte, pode primeiro ser ilustrada analisando o efeito apenas de τ_{xy}, como é mostrado na Fig. 1.7.

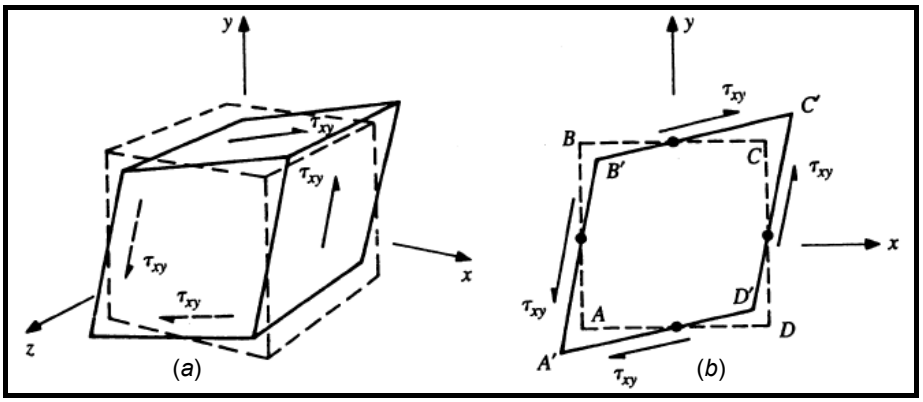


Figura 1.7 – Deformação de corte.

A extensão de corte γ_{xy} é a medida da distorção do elemento paralelepipédico sujeito a tensão. Na Fig. 1.7(*b*), a extensão de corte é dada pela alteração do ângulo *BAD*. Isto é,

$$\gamma_{xy} = \angle BAD - \angle B'A'D' \tag{1.14}$$

onde, γ_{xy} é adimensional e está em radianos. No caso de um material linear, homogéneo e isotrópico, as extensões de corte nos planos *xy*, *yz* e *zx* estão directamente relacionadas com as tensões de corte, por:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \tag{1.15a}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \tag{1.15b}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \tag{1.15c}$$

onde a constante do material *G*, é denominada por *módulo de corte*, em que, para um material linear, homogéneo e isotrópico, este se relaciona com o coeficiente de Poisson, da seguinte forma:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{1.16}$$

Princípios e Métodos Analíticos

A maioria das expressões de mecânica dos materiais traduzem as relações entre a forma e dimensões de um membro, as cargas aí aplicadas e a tensão ou deformação resultantes. Tal expressão é válida apenas em certas condições e é aplicável apenas a algumas situações. Entender estas limitações e a forma como as expressões podem ser combinadas e estendidas à solução de problemas, aos quais elas não são imediatamente aplicáveis, requer um conhecimento de certos princípios e métodos que serão apresentados em, seguida.

Equações de Movimento e de Equilíbrio

As relações existentes entre qualquer instante entre o movimento de um corpo e as forças nele aplicadas, podem ser expressas por estas duas equações:

$$F_x = m\bar{a}_x \tag{1.17}$$

$$T_x = dH_x / dt \tag{1.18}$$

Sendo que, a Eq. (1.17) diz que a componente colinear com a direcção *x* de todas as força aplicadas num corpo, é igual ao produto da massa do corpo com a componente *x* da aceleração do seu centro de massa. Da mesma forma, a Eq. (1.18) diz que o binário aplicado cujo eixo é qualquer linha *x*, de todas a forças aplicadas no corpo, é igual à taxa temporal à qual o momento angular do corpo varia relativamente ao eixo. Se o corpo em questão estiver em equilíbrio, então $F_x = 0$ e $T_x = 0$.

Estas equações, conjuntamente com a Lei de Hooke e valores experimentalmente determinados das constantes elásticas *E*, *G* e ν, constituem a base matemática necessária para resolver a maioria dos problemas de mecânica dos materiais. As expressões mais comuns para a tensão, são obtidas considerando uma parte de um corpo carregado, como um em equilíbrio, com força aplicadas que incluem as tensões e, partir daí, obtendo essas tensões com base em equações de equilíbrio.

Princípio da Sobreposição

Salvo certas excepções, o efeito produzido num sistema elástico (tensão, extensão ou deformação), por um qualquer estado final de carregamento, é igual tanto quando as forças que constituem o carregamento são aplicadas simultaneamente, ou quando estas são aplicadas numa determinada sequência, sendo então o resultado dos efeitos produzidos quando esses carregamentos fossem aplicados como um só carregamento.

Uma excepção a este princípio dá-se na situação em que, a aplicação de uma das cargas causa uma deformação tal no corpo, que permite que outras forças actuem sobre o corpo, forças estas que não teriam qualquer influência, caso a primeira não tivesse sido aplicada. Uma viga sujeita a esforços axial e transversos, é um exemplo; os esforços transversos causam uma deformação no corpo que, por sua vez, permite ao esforço axial produzir um efeito de flexão, que não teria lugar, caso existisse

apenas a força axial. Em caso algum este princípio é aplicável, se as deformações envolvidas forem suficientemente grandes, que alterem as relações geométricas entre as partes existentes no sistema.
O princípio da sobreposição possibilita, muitas vezes, resolver ou subdividir um problema complexo em pequenos problemas, mais simples, onde cada um poderá ser resolvido separadamente e em que, depois, poderão ser algebricamente somados para resultar na solução do problema original.

Princípio da Reciprocidade

Sejam *A* e *B* dois pontos quaisquer, num sistema elástico. Seja o deslocamento de *B*, *u*, numa direcção *U* qualquer, devido à força *P* aplicada numa direcção qualquer *V*, em A. Seja ainda o deslocamento de *A*, *v*, numa direcção qualquer *V*, devido à força *Q* aplicada numa direcção qualquer *U*, em *B*. Daqui resulta que, $Pv = Qu$. Esta é a definição básica do *princípio da reciprocidade*.

Se *P* e *Q* forem iguais e paralelas, e *u* e *v* forem paralelos, a definição poderá ser muito simplificada. Então, para uma viga horizontal com uma carga vertical e um deslocamento definido, princípio expressa a seguinte relação: Uma carga aplicada num qualquer ponto *A* produz a mesma deformação em qualquer ponto *B*, igual ao produzido em *A* se a força fosse aplicada em *B*.
O princípio da reciprocidade é um corolário do princípio da sobreposição e pode, portanto, ser aplicado apenas em caso onde o princípio for válido.

Método das Deformações Consistentes (Compatibilidade de Extensão)

Muitos problemas estaticamente indeterminados, são facilmente resolvidos através da utilização de relações óbvias entre as deformações das várias partes que constituem o sistema, ou entre as deformações produzidas pelas várias cargas inerentes ao sistema. Portanto, a divisão de carga entre as partes de um membro composto, é prontamente constatada através da deformação, de cada parte do sistema, expressa relativamente à carga aplicada a essa parte do sistema e, posteriormente, essas deformações.
O método das deformações consistentes é também baseado no princípio da sobreposição, portanto, também só poderá ser aplicado nos casos onde o princípio é válido.

Princípios e Métodos Energéticos (Energia de Deformação)

Energia de deformação define-se como a energia mecânica acumulada num sistema elasticamente deformado.

1. **Trabalho igual à energia de deformação** – Quando um sistema *elástico* está sujeito a cargas estáticas, o trabalho efectuado pelas cargas, desde que o seu valor é nulo até que o seu valor é máximo, é igual à energia de deformação adquirida pelo sistema. Esta relação pode ser usada directamente para determinar a deformação de um sistema sob uma única carga, onde, assumindo um material linear, mostra que a deformação no ponto onde a carga está aplicada, na direcção da carga, é igual ao dobro da energia de deformação, a dividir pelo valor da carga. Esta relação também é um meio de determinar a carga critica de um sistema, para que este não atinja a instabilidade. Assumindo uma geometria curva razoável, compatível com as condições de fronteira, bem como a correspondente carga crítica obtida

através da equação entre o trabalho da carga e a energia de deformação desenvolvida, ambas calculadas através da curvatura da viga. Para cada curvatura assumida, existe uma carga crítica aproximada correspondente e a carga menor representa a melhor aproximação à verdadeira carga crítica do sistema.

2. **Método das Cargas Unitárias** – Durante o carregamento estático de um sistema elástico, o trabalho externo realizado por uma força *constante* aplicada, é igual ao trabalho interno realizado pelas tensões causadas por essa carga constante. Esta relação é a base para o método seguinte, para obter a deformação de qualquer ponto de um sistema elástico: Uma força unitária imaginária que actua no ponto em questão e na direcção da deformação que se pretende encontrar. As tensões produzidas por essa força unitária darão origem a um determinado trabalho interno durante a aplicação das cargas propriamente ditas. Esse trabalho, que pode ser prontamente encontrado, é igual ao trabalho da força unitária, mas visto que a força unitária é constante, esse trabalho vai ser igual à deformação pretendida. Caso a direcção da deformação não seja conhecida, as suas componentes horizontal e vertical poderão ser obtidas separadamente e, a partir daí, obtém-se a deformação resultante.
3. **Teorema do Trabalho Mínimo** – Quando um sistema elástico está estaticamente carregado, a distribuição de tensões é tal que a energia de extensão será mínima, consistente com o equilíbrio e com as condições de fronteira impostas. Este princípio é usado extensivamente no solução de problema estaticamente indeterminados. No tipo de problemas mais simples (vigas com apoios redundantes ou barras com membros redundantes), o primeiro passo na solução consiste em seleccionar arbitrariamente certas reacções ou membros considerados redundantes, sendo o número e a identidade destes tal que o sistema restante seja determinado. A energia de extensão do sistema é então expressa em termos das reacções ou tensões resultantes desconhecidas. A energia de extensão parcial derivada, respeitante a cada uma das reacções ou tensões redundantes, é igualada a zero e as equações resultantes são resolvidas em ordem às reacções ou tensões redundantes. As restantes reacções ou tensões são então determinadas pelas equações de equilíbrio. Num problema mais geral, é necessário determinar, de entre um número infinito de possíveis distribuições ou configurações de tensões, quais satisfazem a condição de energia mínima de extensão. O desenvolvimento de *software* baseado no método de análise de elementos finitos, tornou praticável a obtenção da solução de muitos problemas deste tipo – análise de cascas, flexão elástica e plástica, etc. – que, formalmente, eram humanamente muito exigentes, ou mesmo intratáveis.

Métodos Numéricos

Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) surgiu através do uso de funções de teste, através de métodos variacionais e resíduos *pesados*, do método das diferenças finitas e análogos estruturais. O MEF supera as dificuldades encontradas pelo método das diferenças finitas, em que a solução das equações diferenciais do problema estrutural é obtida através de uma formulação integral que gera

um sistema de equações algébricas, com funções de teste contínuas que aproximam as quantidades desconhecidas. Um domínio geometricamente complexo, pode ser representado por uma grande, mas finita, colecção de subdomínios, denominados por *elementos finitos*. Para problemas estruturais, a disposição de cada elemento é aproximado por polinómios, que são interpolados relativamente a pontos pré-seleccionados (*nós*) no elemento e, possivelmente, ligados ao elemento. Os polinómios são referidos como *funções de interpolação*, onde métodos de resíduos (Rayleigh-Ritz, Galerkin, etc.) são aplicados para determinar os valores nodais desconhecidos. As condições de fronteira podem ser facilmente aplicadas ao longo de fronteiras curvas, domínios complexos podem ser modelados e malhas não uniformes e não rectangulares podem ser empregadas.

Sendo o MEF uma método numérico que discretiza o domínio de uma estrutura contínua, os erros associados a essa discretização são inevitáveis. Esses erros, são:

1. *Erros Computacionais* – Estes erros devem-se aos erros de arredondamento dependente do *floating-point* do próprio computador e às formulações dos esquemas de integração numérica que são aplicados. A maioria dos códigos comerciais de elementos finitos existentes, concentram esforços no sentido de reduzir este tipo de erros e, consequentemente, o analista geralmente está preocupado apenas com os factores de discretização.
2. *Erros de Discretização* – A geometria e a distribuição de deslocamentos de uma estrutura verdadeira, varia continuamente. Utilizar um número finito de elementos para modelar a estrutura, introduz erros nos resultados, ao compatibilizar a geometria e a distribuição de deslocamentos entre os elementos, devido às inerentes limitações dos elementos. Os erros poderão ser melhorados com o aumento significativo do número de elementos (aumento da densidade da malha). Alternativamente, utilizando um elemento mais complexo, como um elemento de quadrangular de oito nós, tal poderá ajudar a melhorar os resultados e a diminuir os erros. Devido às suas funções de interpolação de maior ordem, o elemento quadrangular de oito nós consegue modelar melhor fronteiras curvas e fornece uma função para a distribuição de extensões maior também.

Métodos Experimentais

Uma estrutura pode ter uma geometria tal ou pode estar sujeita a cargas de uma forma tal, que o uso directo de expressões para os cálculos das tensões e extensões produzidas nesse corpo, não é eficiente. Nesses casos, é necessário então enveredar por técnicas numéricas como o MEF ou por métodos experimentais. Os métodos experimentais podem ser aplicados ao corpo, ou a um modelo do corpo, em alguns casos. A escolha a fazer entre os vários métodos, depende dos resultados desejados, da precisão desejada, da praticabilidade e do custo associado ao método experimental. Nos último anos, a utilização de métodos numéricos tem crescido exponencialmente, mas os métodos experimentais continuam a ser muito eficazes. Muitas investigações fazem usam ambos os métodos, de forma a cruzar informações entre os métodos e, assim, aumentar a precisão dos resultados.

Técnicas de Medição

A determinação das tensões produzidas, por uma dada carga, numa determinada estrutura, através de técnicas experimentais, é feita através da medição de deformações. Dado que a extensão está directamente relacionada à deformação, é prática comum dizer que são feitas medições das extensões. As tensões são então determinadas implicitamente através de relações tensão-extensão. As deformações num sistema estrutural podem ser medidas por variações de resistência, capacitância ou indutância eléctrica de elementos; efeitos ópticos de interferência, difracção ou refracção; ou emissões térmicas. A medição é comparativamente fácil quando a tensão é relativamente uniforme sobre um comprimento considerável do corpo em questão, mas torna-se mais complicada quando a tensão é localizada ou varia muito consoante a posição. Pequenos medidores e grande precisão requer medidores estáveis e uma amplificação eléctrica (se utilizada). No caso de extensões dinâmicas, é também necessária uma resposta de alta frequência adequada, na medição. Num material isotrópico, sujeito a uma tensão uniaxial, basta efectuar uma medição da extensão normal. Numa superfície sujeita a uma tensão biaxial, as medições às extensões normal e ortogonal garantem a determinação do estado de tensão nessas mesmas direcções. Numa superfície sujeita a um estado genérico de tensão plana, a medição de três extensões normais em diferentes direcções, garantem a determinação das tensões nessas mesmas direcções, na posição em que foram medidas as extensões. Numa extremidade livre de um corpo de espessura fina e perpendicular à extremidade, o estado de tensões é uniaxial e pode ser determinado com a medição da extensão tangente à extremidade. Outra táctica, pode ser medir a extensão relativamente à variação de espessura, na extremidade do corpo.

1. **Medição Mecânica** – A medição directa da extensão feita com uma fita Invar sobre o comprimento de um medidor com vários metros de comprimento ou com um par de divisores sobre uma fracção razoável de um medidor. Para medidores mais pequenos, pode ser utilizada a amplificação mecânica, embora a fricção possa ser um problema e a vibração possa dificultar a montagem e a leitura dos valores. A amplificação óptica através do uso de espelhos requer ainda alguns acessórios, sendo uma melhoria embora ainda não satisfatória para a maioria dos amplificadores. Contudo, num laboratório, essas amplificações mecânica e óptica poderão ser utilizadas com sucesso.
2. **Medidores de deslocamento e de extensão** – A evolução no campo dos medidores eléctricos levou a uma variedade de configurações, onde mudanças na resistência, capacitância ou indutância, podem ser relacionadas à extensão e deslocamento, com instrumentos próprios.
    a) *Extensómetro de Resistência* – Nos extensómetros de resistência eléctrica, a gama de comprimentos varia entre cerca de 0.25*mm* e vários centímetros. O material da grelha do medidor pode ser metálico ou semicondutor. Os medidores podem ser obtidos em ligas destinadas a garantir uma saída mínima devido a extensões induzidas por tensão. Medidores de folha metálica são fabricados através de um processo que permite uma vasta gama de configurações de grelha. Os extensómetros de semicondutor garantem

uma maior variação de resistência para uma dada extensão, mas são geralmente extremamente sensíveis a variações de temperatura. São utilizados geralmente em transdutores que garantem uma compensação de temperatura, num conceito adequado. O uso de extensómetros de resistência eléctrica na análise de tensões constitui a maioria das aplicações experimentais.

b) *Extensómetros de Capacitância* – Extensómetros de capacitância são se maiores dimensões e destinados a aplicações massivas, relativamente aos extensómetros de resistência eléctrica, sendo mais utilizados em aplicações acima dos limites de temperatura dos extensómetros de resistência.

c) *Extensómetros de Indutância* – Este tipo de extensómetros tem sido utilizado como indicador de sobrecarga em prensas sem necessária amplificação eléctrica. A relação linear entre o movimento do núcleo e a voltagem de saída de um *transformador linear diferencial* torna possível uma medição precisa de deslocamentos, numa vasta gama de comprimentos de medidores e sob uma grande variedade de condições.

3. Existem ainda outras técnicas de medição, como: **Extensómetros Interferométricos**, **Análise Fotoelástica**, **Técnicas de Moiré**, **Interferometria Holográfica e a Laser**, **Difracção de Raio-X**, etc.

Extensómetros de Resistência Eléctrica

O uso de extensómetros de resistência eléctrica é provavelmente o método de medição mais comum, na análise experimental de tensões. Adicionalmente, a tecnologia de extensómetros é bastante importante no projecto de instrumentos transdutores para a medição de força, binário, pressão, etc.

Os extensómetros de resistência baseiam-se no princípio que diz que, a resistência *R* de um condutor varia como função da extensão normal ε. A resistência de um condutor pode ser expresso, como:

$$R = \rho L/A \tag{1.19}$$

onde *ρ* é a resistividade do condutor (ohms-comprimento) e, *L* e *A* são o comprimento e a secção do condutor, respectivamente. Pode ser demonstrado que, uma variação em *R* devido a variações em *ρ*, *L* e *A*, é dada por:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{1.20}$$

onde ν é o coeficiente de Poisson e, assumindo uma extensão muito pequena no condutor, *ε*, que é dada por $\Delta L/L$. Ao considerar que a variação na resistência do condutor se deve apenas à extensão aplicada, então a Eq. (1.20), fica:

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \varepsilon \tag{1.21}$$

onde,

$$S_a = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon} \tag{1.22}$$

S_a é a *sensibilidade* do condutor à extensão. Os primeiros dois termos vêm directamente das variações dimensionais do condutor, em que, na maioria dos metais, a quantidade $1+2\nu$ varia entre 1.4 e 1.7. O último termo na Eq. (1.22) é denominado por variação da resistência específica

relativamente à extensão. O material mais comum usado nos extensómetros é uma liga de cobre-níquel, que tem uma sensibilidade de 2.1.

Medidores de semicondutor estão também disponíveis, conseguindo atingir níveis de sensibilidade tão elevados como 175. Contudo, é necessário ter um cuidado extra devido à baixa estabilidade térmica deste medidores piezoresistivos.

A maioria dos medidores têm uma resistência de 120*ohm* ou 350*ohm*. Considerando uma extensómetro com uma resistência de 120*ohm*, de forma a obter uma medida da extensão com uma precisão de $\pm 5\mu$, seria necessário medir a variação da resistência com uma precisão de $\pm 1.2 mohm$.

Extensómetros de resistência de liga metálica, usados na análise experimental de tensões, vêm em dois tipos básicos: fio-ligado e folha-ligada (ver Fig. 1.8). Hoje em dia, extensómetros de folha são bastante mais comuns. Este tipo de extensómetros estão comercialmente disponíveis em comprimentos que variam entre 0.2*mm* e cerca de 102*mm*. Para aplicações consideradas normais, este tipo de extensómetros vem montado numa fina película.

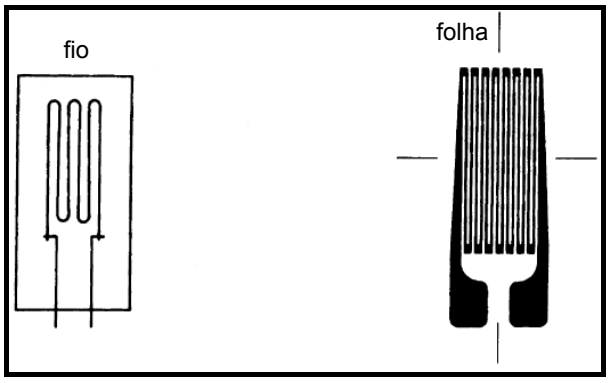


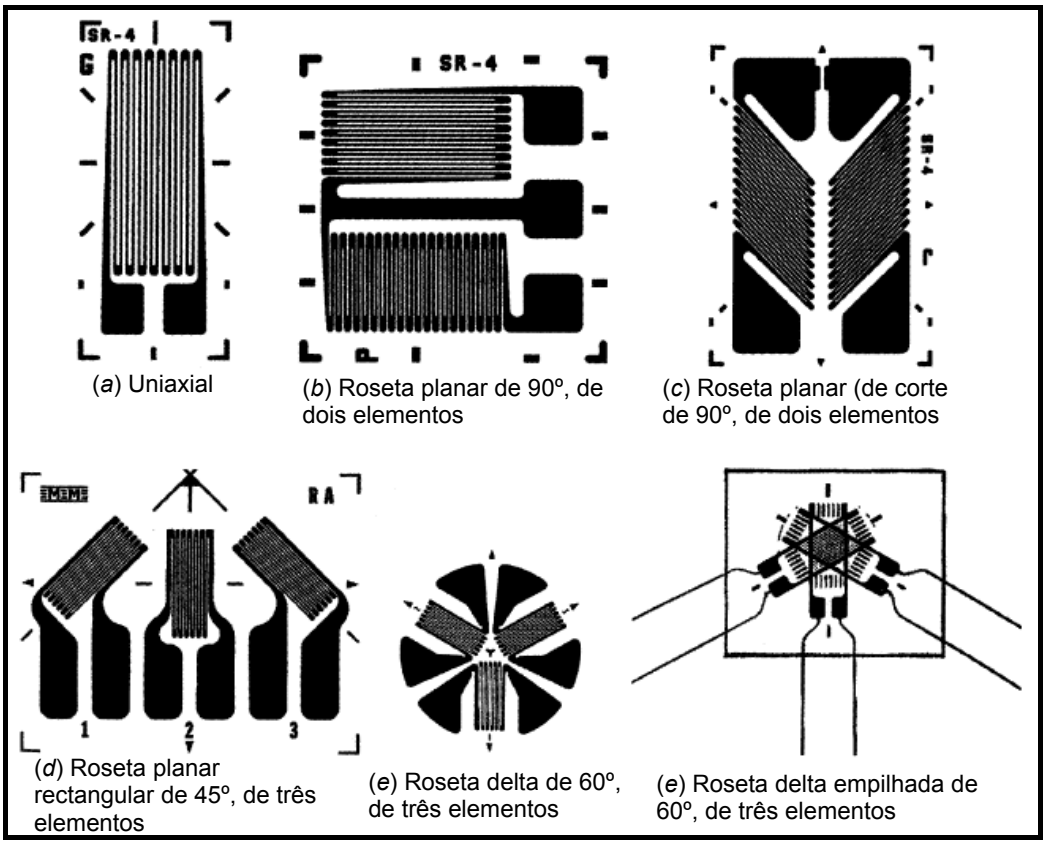
Figura 1.8 – Formas de extensómetros de resistência eléctrica.

Configurações de Extensómetros – Tanto em extensómetros de fio como de folha, existem disponíveis várias configurações e tamanhos. Os extensómetros vêm em várias formas, para aplicações de transdutor ou de análise de tensões. As configurações mais usuais para aplicações de análise de tensões, são mostradas na Fig. 1.9.

Para se perceber como os extensómetros em roseta são utilizados, considere-se o extensómetro rectangular em roseta de três elementos, mostrado na Fig. 1.10, que dá como resultado as componentes da extensão normal, em três direcções separadas entre si por ângulos de 45º. Considerando também um sistema de coordenadas *xy* que coincide com *A* e *C*, ou seja, $\varepsilon_x = \varepsilon_A$ e $\varepsilon_y = \varepsilon_C$. *B* conjuntamente com *A* e *C* dá informação necessária para determinar γ_{xy}. Sabendo que, segundo referências bibliográficas [5], $\varepsilon_{x'} = \varepsilon_x \cos^2\theta + \varepsilon_y \sin^2\theta + \gamma_{xy}\cos\theta\sin\theta$, onde $\theta = 45^\circ$, então:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_x \cos^2 45^\circ + \varepsilon_y \sin^2 45^\circ + \gamma_{xy}\cos 45^\circ \sin 45^\circ = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \gamma_{xy}\right) = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_A + \varepsilon_C + \gamma_{xy}\right)$$

Resolvendo em ordem a γ_{xy}, tem-se: $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C$; uma vez que ε_x, ε_y e γ_{xy} sejam conhecidos, pode-se utilizar a Lei de Hooke para determinar as tensões σ_x, σ_y e τ_{xy}.



(*a*) Uniaxial

(*b*) Roseta planar de 90º, de dois elementos

(*c*) Roseta planar (de corte de 90º, de dois elementos

(*d*) Roseta planar rectangular de 45º, de três elementos

(*e*) Roseta delta de 60º, de três elementos

(*e*) Roseta delta empilhada de 60º, de três elementos

Figura 1.9 – Exemplos de configurações comuns de extensómetros

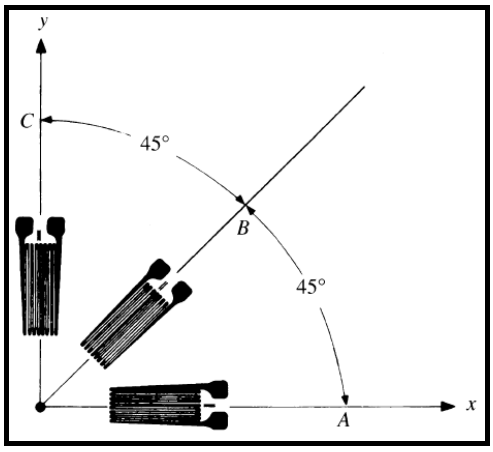


Figura 1.10 – Extensómetro rectangular em roseta, de três elementos.

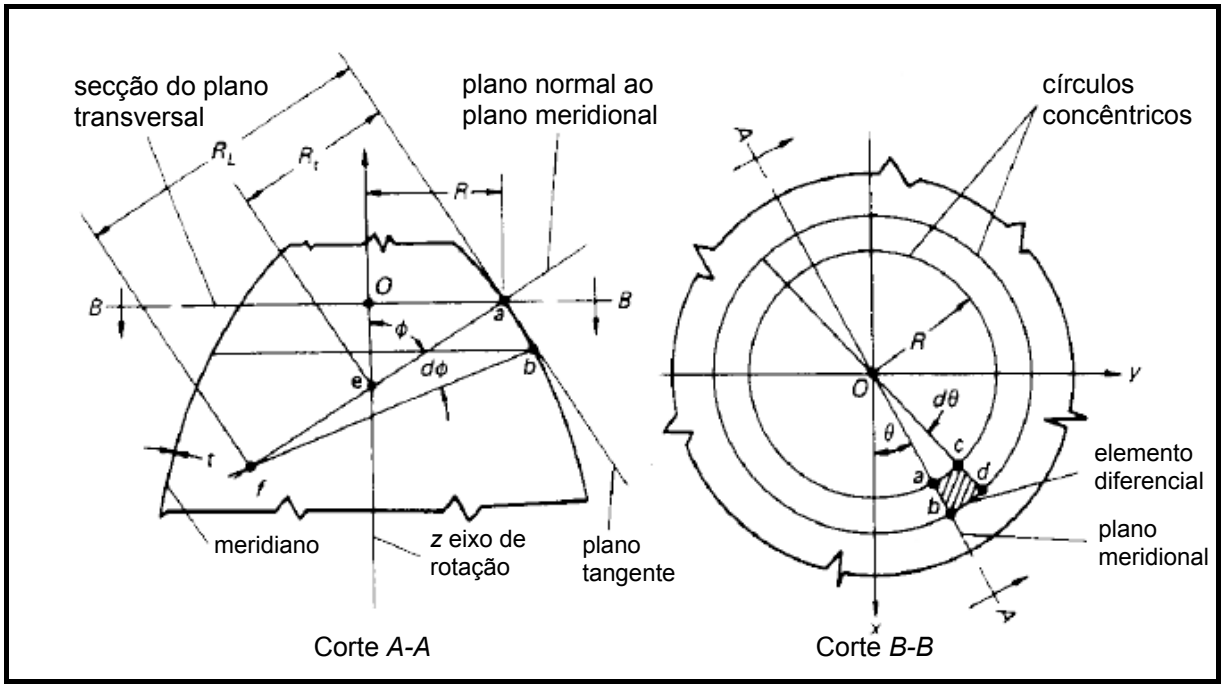
1.3.2. Reservatórios de Pressão

Cascas de Revolução, Vasos de Pressão e Tubos

Circunstâncias e Estado Geral de Tensão

Em análise estrutural, todas as estruturas com formas semelhante a placas curvas, abertas ou fechadas, são denominadas como placas ou cascas. No projecto de vasos de pressão, estes são basicamente contentores fechados, com a funcionalidade de separar dois meios a diferentes pressões. A maioria dos reservatórios de pressão, no mundo industrial, resumem a sua geometria base a apenas duas formas geométricas: esféricos ou cilíndricos, em que, nestes últimos, as extremidades são geralmente semiesféricas, elípticas, cónicas, tori-cónicas, tori-esféricas ou planas. Os componentes que compõem a casca são geralmente soldados ou aparafusados, através de flanges adicionadas, resultando numa casca com um eixo rotacional comum.

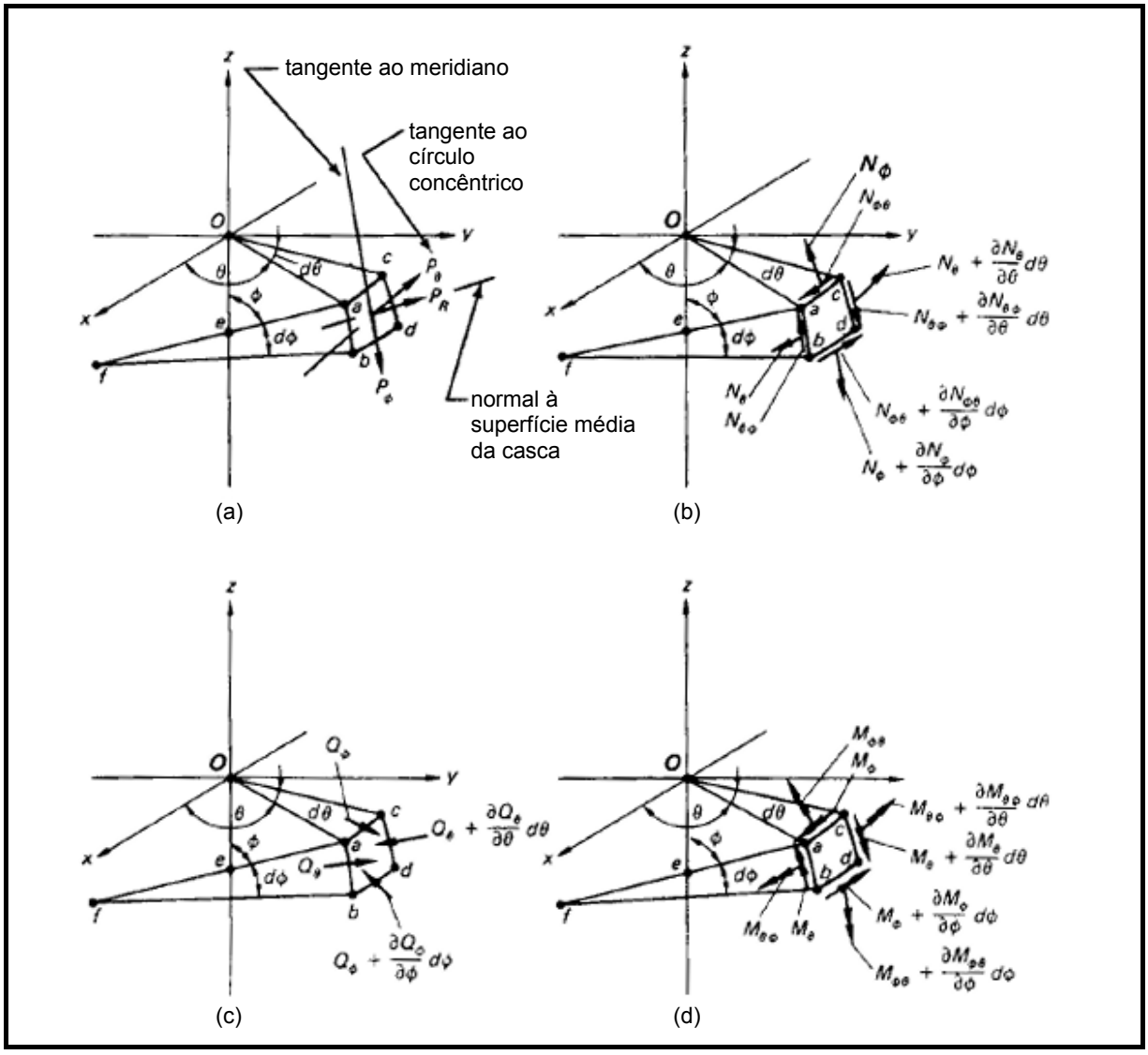
Geralmente, os elementos que constituem a casca são superfícies axissimétricas de revolução, formadas pela rotação de um plano curvo ou de uma linha recta, denominado por meridiano ou gerador, relativamente a um eixo de rotação no plano do meridiano (Fig. 1.11). O plano é denominado por plano meridional e contém o raio de curvatura meridional principal.



R_t = raio tangencial (circunferencial) de curvatura da superfície, denominado também por R_θ ou R_2.
R_L = raio longitudinal (meridional) de curvatura da superfície, denominado também por R_Φ ou R_1.
Ambos os raios de curvatura R_L e R_t assentam sobre a mesma linha, embora tenham dimensões diferentes (excepto no caso esférico, onde $R_L = R_t$).
$R = R_t$ x sin (Φ), raio do círculo concêntrico.
t = espessura da casca.
Φ = ângulo no plano meridional, entre o plano normal ao meridional e o eixo de rotação.
θ = ângulo no plano transversal, entre o plano meridional e o plano meridional de referência (xz).
Área *abcd*, o elemento diferencial da casca $R_L\, d\Phi$ x $R_t\, d\theta$, é intersectado por dois meridianos e dois círculos transversais, visto que é conveniente estudar as tensões nos planos meridional e transversal. Todos os raios são raios médios da casca.

Figura 1.11 – Definições pertencentes a cascas de revolução

Se for exercida uma qualquer força externa (superfície) na casca, a carga num elemento da casca pode ser dividida em três componentes: P_Φ, P_θ e P_R, tal como mostra a Fig. 1.12a. O elemento de uma casca fina e elástica resiste a cargas através da resultante de tensões internas (corpo) e de tensões combinadas, implícitas nas secções transversais do elemento, como mostra a Fig. 1.12b, c e d. As forças superficiais actuam na superfície (interna ou externa), enquanto as forças do corpo actuam através do volume do elemento. Visto que o corpo tem que estar em equilíbrio, é possível obter as equações de equilíbrio estático.



(a) Componentes P_Φ, P_θ e P_R da carga externa que actua num elemento infinitesimal de uma casca axissimétrica. Para pressão interna uniforme P, tem-se $P_\Phi = P_\theta = 0$ e $P_R = P$.
(b) Resultantes da tensão na casca N_Φ, N_θ (tracção ou compressão) e $N_{\Phi\theta}$, $N_{\theta\Phi}$ (corte). Desprezando a forma trapezoidal do elemento $N_{\Phi\theta} = N_{\theta\Phi}$. Estado de tensão da membrana. Para casca carregadas axissimetricamente, $N_{\Phi\theta} = N_{\theta\Phi} = 0$ e $(\delta N_\theta / \delta\theta)\, d\theta = 0$.
(c) Resultantes da tensão de corte transversa Q_Φ e Q_θ. Para cascas axissimétricas carregadas $Q_\theta = 0$.
(d) Resultantes da tensão devido à flexão M_Φ, M_θ e devido à torção $M_{\Phi\theta}$, $M_{\theta\Phi}$. As resultantes de torção são desprezadas na teoria de flexão de cascas. $M_{\Phi\theta} = M_{\theta\Phi} = 0$ para cascas carregadas axissimetricamente.

Figura 1.12 – Tensões resultantes (normal e de corte), tensões combinadas devido à flexão e torção num elemento infinitesimal de uma casca axissimétrica sujeita a uma carga generalizada P_Φ, P_θ e P_R.

Em geral, existem dez resultantes internas diferentes envolvidas:

N_Φ, N_θ, $N_{\Phi\theta}$, $N_{\theta\Phi}$ - forças que actuam no plano da superfície da casca, [N/m].

Q_Φ, Q_θ = corte, [N/m].

M_Φ, M_θ = flexão, [N.m/m]

$M_{\Phi\theta}$, $M_{\theta\Phi}$ = torção, [N.m/m]

que têm de estar em equilíbrio com as forças externas. Visto existirem apenas disponíveis seis equações de equilíbrio estático para determinar a solução, o problema torna-se quatro vezes estaticamente indeterminado. A partir da geometria da casca carregada, antes e depois da deformação, as extensões e as mudanças a nível de curvatura e de torção podem ser determinadas, e assumindo uma relação linear entre tensão-extensão (Lei de Hooke) as equações diferenciais, que relacionam as resultantes das cargas com a posição da superfície média da casca, que faltavam poderão ser determinadas. A solução exacta de um sistema de equações diferenciais deste género com a condições de fronteira dadas, é de resolução extremamente difícil e só pode ser resolvida quando aplicado a alguns casos especiais. Uma vez determinadas as tensões resultantes, as tensões na casca poderão ser obtidas computacionalmente.

Felizmente, a maioria dos problemas que ocorrem na prática, podem ser resolvidos com resultados bastante satisfatórios, através de algumas aproximações e simplificações. A razão principal para tal, é o facto de, na prática, as condições de carga estão aplicadas em cascas de revolução e, desta forma, algumas tensões são muito pequenas e poderão ser desprezadas ou, dada a axissimetria, poderão ser de facto nulas.

A *teoria das cascas de membrana* tratar de problemas onde as tensões internas são apenas devidas à tensões resultantes na membrana N_Φ, N_θ e $N_{\Phi\theta} = N_{\theta\Phi}$ (ver Fig. 1.12b). As tensões de corte resultantes ($N_{\Phi\theta}$, $N_{\theta\Phi}$) para carregamentos axissimétricos são nulas, o que irá simplificar a solução. As tensões resultantes podem ser resolvidas através de equações de equilíbrio estático fundamentais, sendo que as tensões resultantes na casca, são:

$$\text{Tensão longitudinal: } \sigma_L = \sigma_\phi = N_\phi / t \tag{1.23}$$

$$\text{Tensão tangencial: } \sigma_t = \sigma_\theta = N_\theta / t \tag{1.24}$$

A *teoria da flexão em cascas*, adicionalmente à tensões de membrana, incluem tensões resultantes relativamente à flexão (Fig. 1.12d) e ao esforço transverso (Fig. 1.12c). Aqui o número de incógnitas excede o número de equações de equilíbrio disponíveis e será necessário extrair, a partir de relações de deformação, equações diferenciais adicionais. Uma vez determinadas as resultantes N_Φ, N_θ, M_Φ e M_θ, as tensões na casca, são:

$$\text{Tensão longitudinal: } \sigma_L = \sigma_\phi = N_\phi / t \pm 6M_\phi / t^2 \tag{1.25}$$

$$\text{Tensão tangencial: } \sigma_t = \sigma_\theta = N_\theta / t \pm 6M_\theta / t^2 \tag{1.26}$$

$$\text{Tensão de Corte: } \tau_\phi = Q_\phi / t \tag{1.27}$$

Cascas Espessas de Revolução

Dadas as condições do problema envolvidas neste trabalho, foi necessário recorrer a esta ferramenta especifica, visto que a estrutura principal do reactor acabou por ser uma estrutura considerada casca espessa.

No caso da espessura da parede de um vaso for superior a cerca de um décimo do seu raio médio, as tensões meridionais e de corte não poderão ser consideradas uniformes ao longo da espessura da parede e, consequentemente, a tensão radial não poderá ser desprezada. Estas tensões em vasos de parede espessa, denominadas por *tensões da parede*, terão de ser determinadas por expressões bastante diferentes daquelas usadas no caso de tensões de membrana em vasos de espessura fina.

A partir da bibliografia [5], é possível verificar que, para casos em que, num cilindro de parede espessa, está aplicada um pressão *p* uniformemente distribuída, com direcção radial, a tensão tangencial no cilindro, na superfície interna, aproxima-se do valor da pressão *p* à medida que a diferença entre os raio interno e externo do cilindro tendem para infinito:

$$\sigma_\theta = \frac{p r_i^2 \left(r_o^2 + r^2\right)}{r^2 \left(r_o^2 - r_i^2\right)} \quad \Rightarrow \quad \left(\sigma_\theta\right)_{\substack{\max \\ r=r_i}} = p \frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \tag{1.28}$$

$$\lim_{(r_o - r_i) \to \infty} \sigma_\theta = p \tag{1.29}$$

onde, r_o e r_i são os raios externo e interno do cilindro, respectivamente. Aparentemente, num caso em que se pretenda limitar a tensão a um valor σ, a pressão interna nunca deverá exceder $p = \sigma$, qualquer que seja a espessura da parede.

A tensão axial σ_z, no caso de um cilindro de parede espessa, com os topos tapados por tampas planas, carregado com uma pressão interna uniforme *p*, esta é dada por:

$$\sigma_z = \frac{p r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \tag{1.30}$$

onde se pode verificar claramente que, esta é constante, tanto ao longo da espessura da parede do cilindro, como ao longo do comprimento deste.

Por fim, a tensão radial σ_r, é expressa por:

$$\sigma_r = -\frac{p r_i^2 \left(r_o^2 - r^2\right)}{r^2 \left(r_o^2 - r_i^2\right)} \quad \Rightarrow \quad \left(\sigma_r\right)_{\substack{\max \\ r=r_i}} = -p \tag{1.31}$$

A validade das expressões de tensão máxima de cada uma das componentes, excepto de σ_z visto ser constante ao longo da espessura, pode ser comprovada graficamente (Fig. 1.13). Como é fácil de ver, tanto em σ_θ como em σ_r (esta em módulo), os seus valores máximos estão localizados na parede interna do cilindro, $r = r_i$:

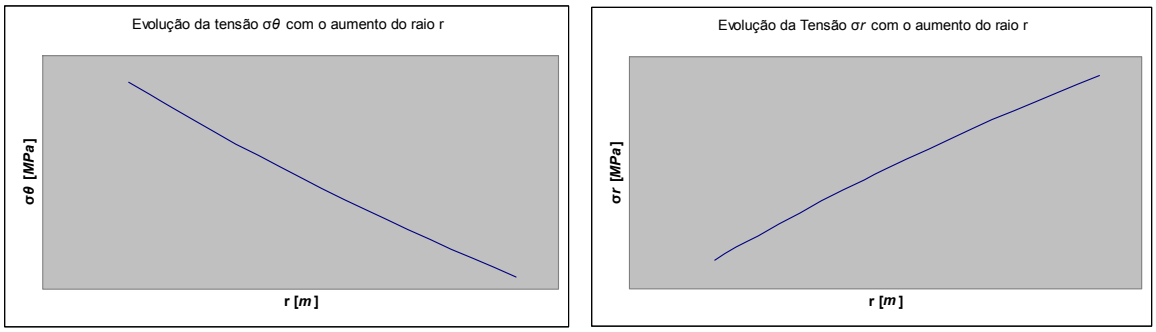


Figura 1.13 – Gráficos da evolução de σ_θ e σ_r, com o aumento de *r*.

Placas Planas

As condições para placas planas assumem que, a placa é plana, tem espessura uniforme e que é constituída por um material homogéneo e isotrópico, bem como, que a sua espessura é menor que um quarto da sua dimensão transversal e que a deformação é menor que metade da espessura. Mais ainda, todas as cargas envolvidas são normais ao plano da placa e as tensões envolvidas nesta não excedem o seu limite de elasticidade.

Comportamento – A placa deforma-se. A superfície a meio da espessura da placa (superfície média) mantém-se sem tensões associadas, mas em todos os outros pontos, existem tensões biaxiais, no plano da placa (assumindo este, como um plano horizontal). No plano vertical, linhas originalmente direitas verticais, mantém-se direitas após a deformação, embora inclinadas relativamente ao plano vertical; o valor da tensão nos pontos não pertencentes à superfície média, é tanto maior quanto mais distantes se situam da superfície média, sendo que as tensões máximas se situam nas superfícies superior e inferior da placa.

Condições na Fronteira da Placa – Numa visão construtiva, é difícil definir uma condição exacta na fronteira de uma placa, sendo também especialmente complicado obter uma condição de encastramento na fronteira da mesma. Apenas uma pequena força horizontal na linha de contacto pode reduzir apreciavelmente a tensão e deformação numa placa simplesmente apoiada; contudo, uma ligeira cedência numa fronteira encastrada, alivia consideravelmente as tensões nessa zona, enquanto a tensão e deformação aumentam no centro da placa.

Se for efectuado um projecto de uma placa com fronteiras sujeitas a determinadas condições, ao efectuar-se o projecto para uma placa apoiada, a segurança é mais valorizada do que se o projecto for efectuado para uma placa encastrada.

Flexão de Placas de Espessura Uniforme, com Condições de Fronteira Circulares

As expressões revistas na bibliografia consultada [5], para flexão de placas de espessura uniforme com condições de fronteira circulares, baseiam-se numa análise matemática muito aproximada e podem perfeitamente assumir-se como expressões suficientemente precisas, desde que as condições para placas planas, descritas acima, sejam respeitadas.

No caso de uma placa simplesmente apoiada, sujeita a uma força uniformemente distribuída (pressão - *p*) sobre toda a sua superfície, no plano da placa, o momento flector a que a placa está sujeita, é dado por:

$$M = \frac{pr(3+\nu)}{16} \tag{1.32}$$

onde r é o raio da placa e ν é o coeficiente de Poisson do material que constitui a placa em estudo. A tensão devido à flexão a que a placa está sujeita, é dada por:

$$\sigma = \frac{6M}{t^2} \tag{1.33}$$

sendo a constante da característica da placa:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \tag{1.34}$$

onde, t é a espessura da placa e E é o módulo de Young do material do qual a placa é constituída.
A determinação das componentes das tensões a que uma placa está sujeita, é necessário recorrer à teoria de placas e cascas, de onde se sabe à partida que a componente σ_z (perpendicular à placa) é igual à pressão aplicada na placa:

$$\sigma_z = p \tag{1.35}$$

Para a determinação das componentes σ_r e σ_θ, parte-se do sistema de equações:

$$\begin{Bmatrix} M_r \\ M_\theta \end{Bmatrix} = -D\begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \frac{p}{16D}\left(3r^2 - r_o^2\right) \\ \frac{p}{16D}\left(r^2 - r_o^2\right) \end{Bmatrix} \tag{1.36}$$

onde, r_o é o raio da placa e r é o ponto na placa onde se quer determinar o valor do momento, na direcção radial. Substituindo a Eq. (1.34) na Eq. (1.36), obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} M_r \\ M_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{p}{16D}\left[\left(3r^2 - r_o^2\right) + \nu\left(r^2 - r_o^2\right)\right] \\ -\frac{p}{16D}\left[\nu\left(3r^2 - r_o^2\right) + \left(r^2 - r_o^2\right)\right] \end{Bmatrix} \tag{1.37}$$

Pela Eq. (1.33) e tendo em conta que os pontos de tensão máxima na placa se situam nos pontos mais afastados da sua superfície média (nas superfícies inferior e superior), então as componentes radial e tangencial de tensão máxima, são dadas pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix}_{\substack{\max \\ z=\pm t/2}} = \pm\frac{6}{t^2}\begin{Bmatrix} M_r \\ M_\theta \end{Bmatrix} = \pm\frac{6}{t^2}\begin{Bmatrix} -\frac{p}{16}\left[\left(3r^2 - r_o^2\right) + \nu\left(r^2 - r_o^2\right)\right] \\ -\frac{p}{16}\left[\nu\left(3r^2 - r_o^2\right) + \left(r^2 - r_o^2\right)\right] \end{Bmatrix} \tag{1.38}$$

Sabendo que σ_r, σ_θ e σ_z correspondem às componentes da tensão equivalente, nas direcções principais, σ_1, σ_2 e σ_3 (não necessariamente por esta ordem), então é possível obter a tensão equivalente de *Von Mises* directamente, pela expressão:

$$\sigma_{eq_{VM}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \tag{1.39}$$

1.3.3. Tensões Térmicas

Sempre que se previne a expansão ou contracção que normalmente resultaria do aquecimento e arrefecimento de um corpo, originam-se *tensões* denominadas *térmicas*. É conveniente distinguir dois tipos de circunstâncias sob as quais ocorrem tensões térmicas:

1. A geometria do corpo e as condições térmicas são tais que não existiriam tensões, excepto devido aos *constrangimentos de forças externas*; num caso destes, as tensões podem ser encontradas pela determinação da geometria e dimensões que o corpo teria se não tivesse constrangimentos e depois calculando as tensões induzidas, forçando o corpo a tomar a sua geometria e dimensões originais.
2. A geometria do corpo e as condições térmicas são tais que, as tensões são induzidas devido à *ausência de constrangimentos externos*, somente devido à incompatibilidade das expansões e contracções naturais, das diferentes partes do corpo.

Nos seguintes exemplos, o módulo de elasticidade E e o coeficiente de expansão térmica γ consideram-se constantes para a gama de temperaturas envolvidas e o incremento de temperatura (diferença de temperaturas) ΔT considera-se positivo. Quando ΔT é negativo, a tensão resultante é de natureza oposta. É também considerado que as tensões compressivas resultantes, não geram empeno e que a tensão de cedência não é atingida. Caso, os resultados mostrem presença de empeno ou caso a tensão de cedência seja ultrapassada, então a solução terá que ser modificada recorrendo a métodos apropriados.

Placas Planas

No caso de uma placa plana, de espessura uniforme t, com qualquer geometria, sujeita a uma temperatura uniforme T numa das faces, sendo que na outra face está sujeita a uma temperatura $T+\Delta T$, o gradiente de temperatura entre as duas faces é linear. A placa assumiria naturalmente uma curvatura esférica com raio:

$$r = t/(\Delta T\gamma) \tag{1.40}$$

No caso de uma fronteira fixa, a placa é forçada a permanecer plana, devido a momentos uniformemente distribuído ao longo da fronteira, sendo que, a tensão máxima resultante da flexão é dada por:

$$\sigma = \frac{1}{2}\frac{\Delta T\gamma E}{(1-\nu)} \quad \text{(compressão na face quente e tracção na face fria)} \tag{1.41}$$

Se a placa tiver uma geometria circular, não resultam tensões devido aos constrangimentos, na direcção normal ao plano da placa.

Tubo de Parede Espessa

Considere-se um tubo de parede espessa, com raio interno r_i e raio externo r_o, sujeito a uma temperatura uniforme T na superfície externa e uma temperatura uniforme $T+\Delta T$ na superfície interna. Nestas circunstâncias, as tensões máximas originadas, são tangenciais e ocorrem nas superfícies interna e externa, sendo estas expressas por:

Superfície externa (tracção):

$$\sigma_t = \frac{\Delta T \gamma E}{2(1-\nu)\ln(r_o/r_i)}\left(1-\frac{2r_i^2}{r_o^2-r_i^2}\ln\frac{r_o}{r_i}\right) \qquad (1.42)$$

Superfície interna (compressão):

$$\sigma_t = \frac{\Delta T \gamma E}{2(1-\nu)\ln(r_o/r_i)}\left(1-\frac{2r_o^2}{r_o^2-r_i^2}\ln\frac{r_o}{r_i}\right) \qquad (1.43)$$

2. PROJECTO E DESENVOLVIMENTO

2.1. Introdução

Este capítulo inicia-se com a descrição pormenorizada de todo o problema tratado neste trabalho, incluindo todas as condições e limitações impostas originalmente, bem como, aquelas que surgiram no decorrer do trabalho, devido a impossibilidades físicas, problemas construtivos, fornecimento de material, restrições a nível de propriedades de materiais, etc., que trouxeram bastantes problemas a nível de restruturação de grande parte do trabalho, levando também ao estudo de novos conceitos que permitissem solucionar os obstáculos que foram surgindo.

Serão posteriormente mostrados alguns dos conceitos que foram sendo estudados, até se chegar ao conceito final, serão justificadas como as condições e limitações descritas influenciaram a evolução desses mesmo conceitos, quais os problemas que surgiram e quais as soluções encontradas.

Por fim, serão apresentados os componentes e materiais utilizados na concepção, estudo, projecto e produção do reactor de alta pressão e alta temperatura.

Parece pertinente, nesta altura, referir que **todos** os estudos incluídos no presente trabalho, adoptaram um coeficiente de segurança, determinado através do *Método de Pugsley* [1]. O coeficiente de segurança pode ser expresso por:

$$n_s = \sigma_{ced} / \sigma_{adm} \tag{2.1}$$

onde σ_{ced} é a tensão de cedência do material e σ_{adm} é a tensão admissível no projecto. Mas, segundo *Pugsley*, o coeficiente de segurança é traduzido pela expressão,

$$n_s = n_{sx} n_{sy} \tag{2.2}$$

onde, é necessário ter em conta os seguintes factores:

- n_{sx} = factor de segurança que envolve as características *A*, *B* e *C*
- A = qualidade dos materiais, manutenção e inspecção
- B = conhecimento das cargas aplicadas
- C = comprovação do método de cálculo
- n_{sy} = factor de segurança que envolve as características *D* e *E*
- D = risco de vidas humanas
- E = risco de impacto económico

Estes factores, são obtidos de forma simples através das tabelas disponibilizadas na Fig. 2.1.

Considerando então, os factores: A – razoável; B – muito bom; C – bom; D – Muito sério; E – sério. Desta forma, o factor de segurança considerado, ao longo de todo o projecto, é igual a:

$$n_s = n_{sx} n_{sy} = 1.7 \times 1.5 = 2.55$$

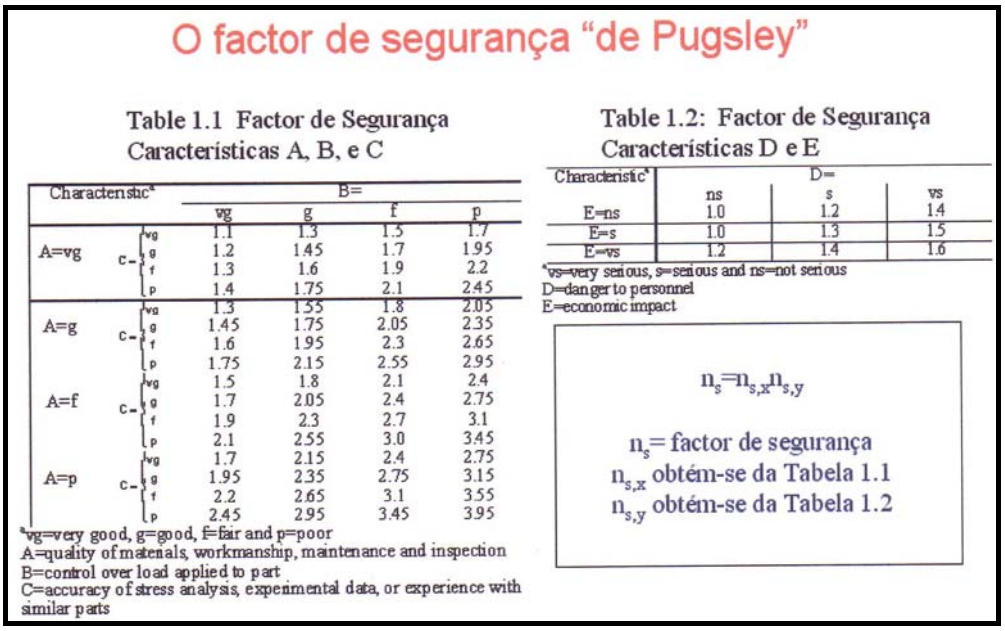

O factor de segurança "de Pugsley"
Table 1.1 Factor de Segurança
Características A, B, e C
Table 1.2: Factor de Segurança
Características D e E
$n_s = n_{s,x} n_{s,y}$
n_s = factor de segurança
$n_{s,x}$ obtém-se da Tabela 1.1
$n_{s,y}$ obtém-se da Tabela 1.2

Figura 2.1 – Tabelas de *Pugsley* para Determinação do Factor de Segurança.

2.2. Condições e Limitações

Inicialmente, as condições básicas pretendidas para o presente trabalho, incluíam a concepção, projecto e produção de um reservatório de pressão, que suportasse, em simultâneo, as seguintes condições:

Condições Mecânica e Térmica	
Pressão Máxima [MPa]	10
Temperatura Máxima [ºC]	700

Tabela 2-1 – Condições Preliminares de Projecto.

À medida que o projecto foi avançando, mais condições foram sendo incluídas, por forma a conjugar uma série de características no vaso de pressão, de modo a torná-lo cada vez mais versátil, adicionando um número de funcionalidades que previam uma variada gama de funcionalidades, das quais o reservatório teria capacidade de comportar. Embora a versatilidade seja, na grande maioria da vezes, adversária da eficiência, tentou-se sempre chegar a um compromisso entre as duas partes: versatilidade *versus* optimização. Contudo, a própria incompatibilidade de certos requisitos, obrigou à alteração de algumas das características pretendidas.

As funcionalidades e características que foram surgindo ao longo do projecto, para além das condições iniciais, exigem essencialmente a inclusão de dispositivos de reacção, de trabalho, de monitorização e de trocas com o exterior. Têm-se então, os seguintes objectivos a respeitar:

	Condições
1	Pressão Máxima: 10 *MPa*
2	Temperatura Máxima: 700 *ºC*
3	Duas câmaras internas, separadas por uma membrana para fins de trocas iónicas entre as duas câmaras
4	Presença de, no mínimo, dois eléctrodos (um de trabalho e um de referência) numa das câmaras e três eléctrodos (um de trabalho, um contra-eléctrodo e um de referência) na outra câmara
5	Presença de um eléctrodo para efeitos de medição do nível de pH interior
6	Eléctrodos de trabalho com uma área de cerca de 100 cm^2
7	Membrana que separa as duas câmaras, também com uma área de cerca de 100 cm^2 e com a exigência de estar continuamente submersa nos reagentes
8	Possibilidade de utilização do reactor com meios extremos, relativamente aos reagentes, em termos de acidez ou de alcalinidade
9	Presença de dispositivos de monitorização de pressão e de temperatura
10	Alimentação eléctrica para os eléctrodos de trabalho, contra-eléctrodo e sistema de aquecimento
11	Equilíbrio de pressão entre as duas câmaras, devido à natureza da membrana que as separa
12	Inibição de contacto entre a estrutura externa (aço) do reactor e os reagentes, de forma a evitar contaminação dos reagentes devido à estrutura externa, e vice-versa

Tabela 2-2 – Condições de Projecto Pretendidas.

Por motivos ligados ao fornecimento de material e mesmo às propriedades dos materiais existentes hoje em dia, nem todos estes requisitos são possíveis de concretizar. Numa fase já intermédia do projecto, foi necessário proceder a uma alteração dos requisitos descriminados acima, devido à impossibilidade de ter, em simultâneo, alta pressão (100*bar*), alta temperatura (700º*C*) e corrente eléctrica no sistema (baixa tensão), bem como, isolamento eléctrico da estrutura metálica do reactor e vedação da zona interna para o exterior. O problema recorrente fundamenta-se, essencialmente, no facto dos materiais existentes para isolar electricamente as partes metálicas da estrutura e para efeitos de vedação, não suportarem as restantes condições em simultâneo.

Por este motivo, as condições **1** e **2** tiveram que sofrer alterações: ambas podem ser aplicadas, mas não em simultâneo. Ou seja, a presença de uma pressão da ordem dos 100*bar*, implica que a temperatura máxima no sistema, não ultrapasse os 200º*C*; e a ausência de pressão, permite que o sistema possa trabalhar a temperaturas da ordem dos 700º*C*. Desta forma, as condições finais de projecto são os descriminados na Tabela 2-3:

	Condições
1	Na presença de pressão, o seu valor máximo é de 10*MPa* e a temperatura interna não poderá ir além dos 200º*C*
2	Na ausência de pressão, a temperatura máxima interna será de 700º*C*
3	Duas câmaras internas, separadas por uma membrana para fins de trocas iónicas entre as duas câmaras
4	Presença de, no mínimo, dois eléctrodos (um de trabalho e um de referência) numa das câmaras e três eléctrodos (um de trabalho, um contra-eléctrodo e um de referência) na outra câmara
5	Presença de um eléctrodo para efeitos de medição do nível de pH interior
6	Eléctrodos de trabalho com uma área de cerca de 100 cm^2
7	Membrana que separa as duas câmaras, também com uma área de cerca de 100 cm^2 e com a exigência de estar continuamente submersa nos reagentes
8	Possibilidade de utilização do reactor com meios extremos, relativamente aos reagentes, em termos de acidez ou de alcalinidade
9	Presença de dispositivos de monitorização de pressão e de temperatura
10	Alimentação eléctrica para os eléctrodos de trabalho, contra-eléctrodo e sistema de aquecimento
11	Equilíbrio de pressão entre as duas câmaras, devido à natureza da membrana que as separa
12	Inibição de contacto entre a estrutura externa (aço) do reactor e os reagentes, de forma a evitar contaminação dos reagentes devido à estrutura externa, e vice-versa

Tabela 2-3 – Condições Finais de Projecto.

Relativamente a todas as outras condições, é de notar que, algumas delas, como a dimensão dos eléctrodos de trabalho e da membrana, a possibilidade de trabalhar com meios altamente alcalinos ou ácidos, e o facto de não haver contacto entre os reagentes e o metal da estrutura externa do reactor, foram impostas durante o decorrer do trabalho. Para além disso, na altura em que os fornecedores de material foram contactados de forma a tentar encontrar as melhores soluções em termos de matéria-prima, para a construção do reactor, as dimensões e características pretendidas para os materiais, nem sempre puderam ser satisfeitas, obrigando mais uma vez a efectuar pequenas alterações de projecto. E, portanto, daí a necessidade de terem sido pensados e estudados mais do que um conceito, sendo estes apresentados na secção 2.3.

2.3. Conceitos Estudados

Como foi mencionado anteriormente, os conceitos estudados foram surgindo à medida que os problemas construtivos, condições, limitações de projecto e a nível de características ou de fornecimento do material, foram surgindo.

Um primeiro esboço, foi concebido após serem conhecidas as algumas das condições de projecto, estando este apresentado na Fig. 2.2.

Este conceito sugere a existência de duas câmaras, separadas por uma estrutura metálica interna, a membrana intermédia e um sistema pensado para efectuar o equilíbrio de pressão entre as duas câmaras. Para além disso, a estrutura principal seria composta por três camadas cilíndricas, uma interior de revestimento (em aço ou em material refractário), amovível, que sustentaria os reagentes,

uma intermédia de aço que suportaria todas as cargas estruturais e térmicas, e uma camada isoladora externa.

A ideia do sistema que equilibraria a pressão das duas câmaras, foi pensado com o seguinte sentido: sempre que o êmbolo colidisse com um dos actuadores/batentes, este iria activar uma válvula de emergência na câmara contrária àquela onde se encontrasse o batente com o qual o êmbolo colidiu. No entanto, este conceito tornar-se-ia insustentável do ponto de vista do isolamento entre as duas câmaras, bem como, do ponto de vista da incompatibilidade entre as temperaturas praticadas dentro do reactor e a falta de resistência térmica dos actuadores.

Para além disso, um dos maiores problemas neste conceito, passaria pela fixação da membrana intermédia. E assim, surgiu o segundo conceito, apresentado na Fig. 2.3:

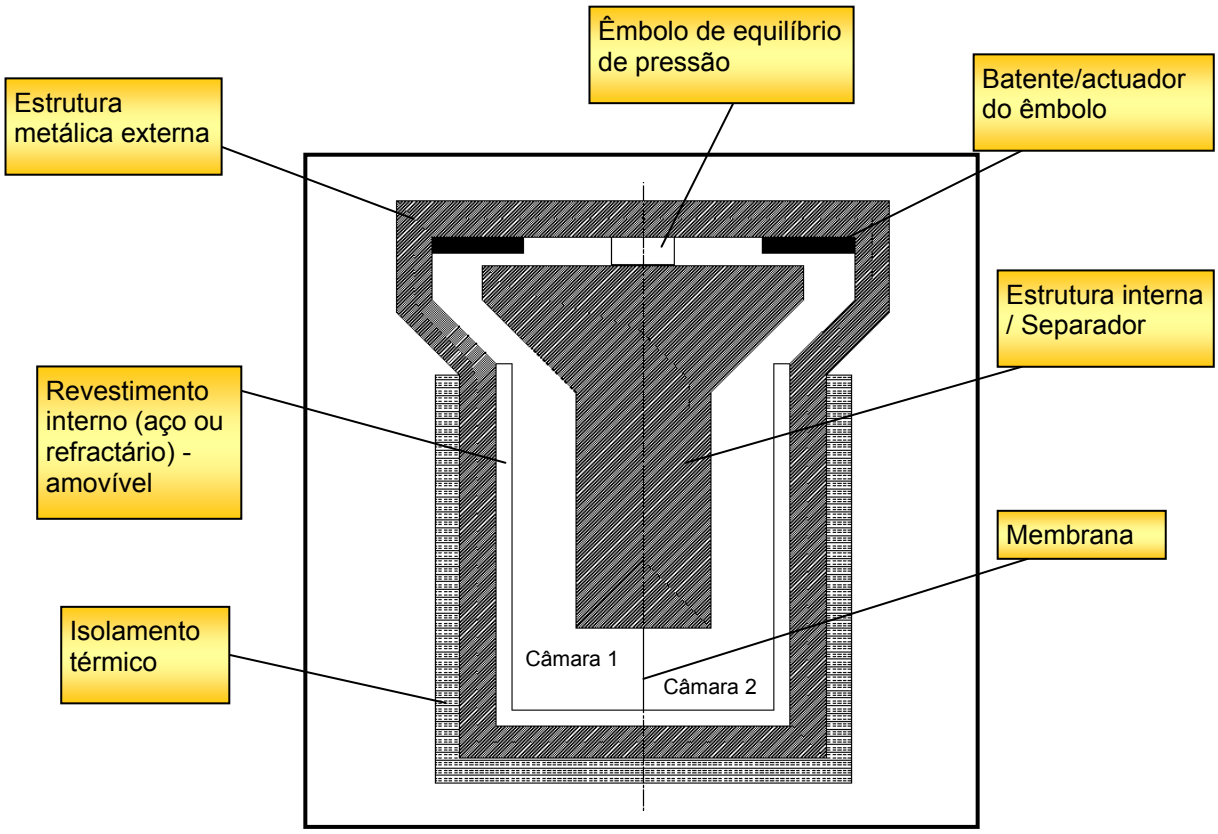


Figura 2.2 – Primeiro conceito para o reactor.

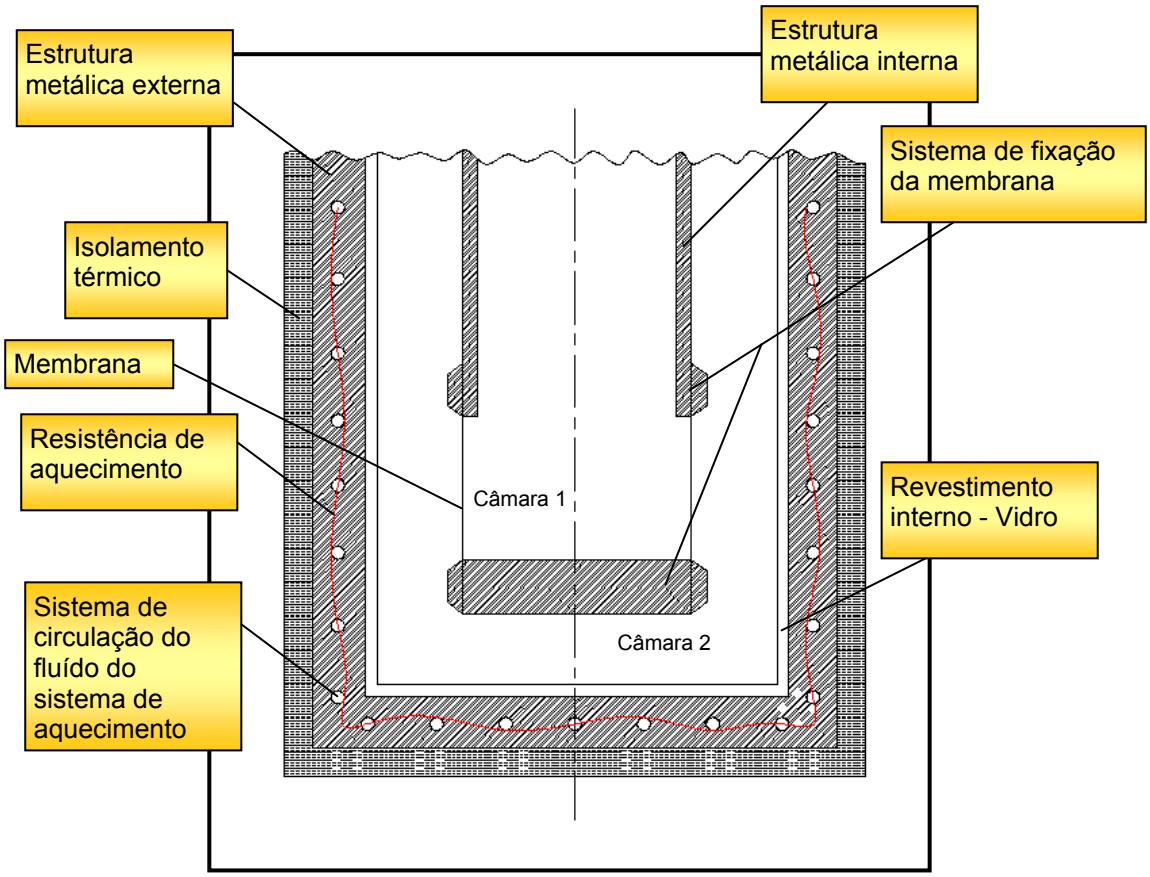


Figura 2.3 – Segundo conceito para o reactor.

Este segundo conceito, inclui uma nova disposição das câmaras (concêntricas) um sistema mais adequado para a fixação da membrana intermédia, uma camada interna de vidro (em vez do aço ou refractário sugerido no primeiro conceito) o que elimina a possibilidade de contaminação dos reagentes, e um sistema de aquecimento que inclui um sistema de circulação de fluídos ou gases e uma resistência de aquecimento.

No entanto, este segundo conceito, apresenta novos problemas, também devido a novas exigências que surgiram na altura em que este foi concebido. Esses problemas, resumem-se ao facto de, nestas condições, as dimensões da membrana não permitirem obter uma área de interacção de cerca de $100cm^2$ entre as duas câmaras, a não ser que as dimensões do reactor fossem algo exageradas, relativamente ao que era solicitado. Para além disso, e tal como acontece no terceiro conceito (ver Fig. 2.4), este método de fixação da membrana intermédia sugere a utilização de componentes em aço, o que traria de novo o problema de possibilidade de contaminação dos reagentes.

Por fim, conclui-se também que o sistema de aquecimento sugerido inconcebível, visto que, segundo a bibliografia [10], [11], [13], [14], [15] e [16], os óleos utilizados em sistemas de aquecimento, não suportam temperaturas acima dos 300~400ºC. Ainda mais, no caso de se optar por incluir gases no sistema de aquecimento, é necessário ter em conta que estes são um meio de transferência de calor pobre, relativamente aos líquidos, devido às suas baixas conductividades térmicas e capacidades de calor por unidade de volume. O hidrogénio é o gás que possui as melhores características (comparado com o hélio, dióxido de carbono e ar), mas não é aplicável a altas temperaturas, devido

ao perigo de explosão. O hélio, é bastante utilizado em reactores de alta pressão e alta temperatura, visto ter propriedades de transferência de calor razoáveis (inferiores às do hidrogénio, mas muito superiores às do dióxido de carbono e do ar), tendo uma grande estabilidade numa gama de temperaturas entre os 760 e os 1000º*C*. No que diz respeito a fluidos inorgânicos (sais), como é o caso do hidróxido de sódio, apesar de terem uma pressão de vapor desprezável a altas temperaturas, a sua natureza altamente corrosiva é um ponto vincadamente desfavorável. O hidróxido de sódio, tem excelentes propriedades de transferência de calor, mas é extremamente corrosivo a altas temperaturas, ou acima do seu ponto de fusão (98º*C*), o que põe totalmente de parte esta hipótese.
Desta forma, foi necessário recorrer a novos conceitos, como aquele que é mostrado na Fig. 2.4.
Neste novo conceito, foi pensada uma nova forma de fixar a membrana intermédia (ver em pormenor na Fig. 2.5). Para além disso, as camadas externas sofreram também uma alteração na sua disposição, sendo que, dentro da estrutura principal do reactor, está o refractário que terá também funções de isolamento térmico, seguidamente, o novo sistema de aquecimento constituído simplesmente por uma banda de resistência de aquecimento capaz de atingir as temperaturas pretendidas, e finalmente, o revestimento interno de vidro que, tal como no conceito anterior, elimina a possibilidade de contaminação dos reagentes e resiste ao contacto directo com o sistema de aquecimento, permitindo ainda uma boa transmissibilidade de infravermelhos.
Como é possível constatar pela Fig. 2.5, à semelhança da câmara externa, a câmara interna inclui também várias camadas de material: um estrutura principal em aço; um anel também em aço e roscado, de forma a ser acoplado à estrutura principal, ao mesmo que sustentaria e acomodaria o apoio elástico, a membrana, o vedante e o vidro interno; e uma camada interna de vidro que, tal como na câmara externa, teria como principal objectivo não contaminar a os reagentes na câmara interna.

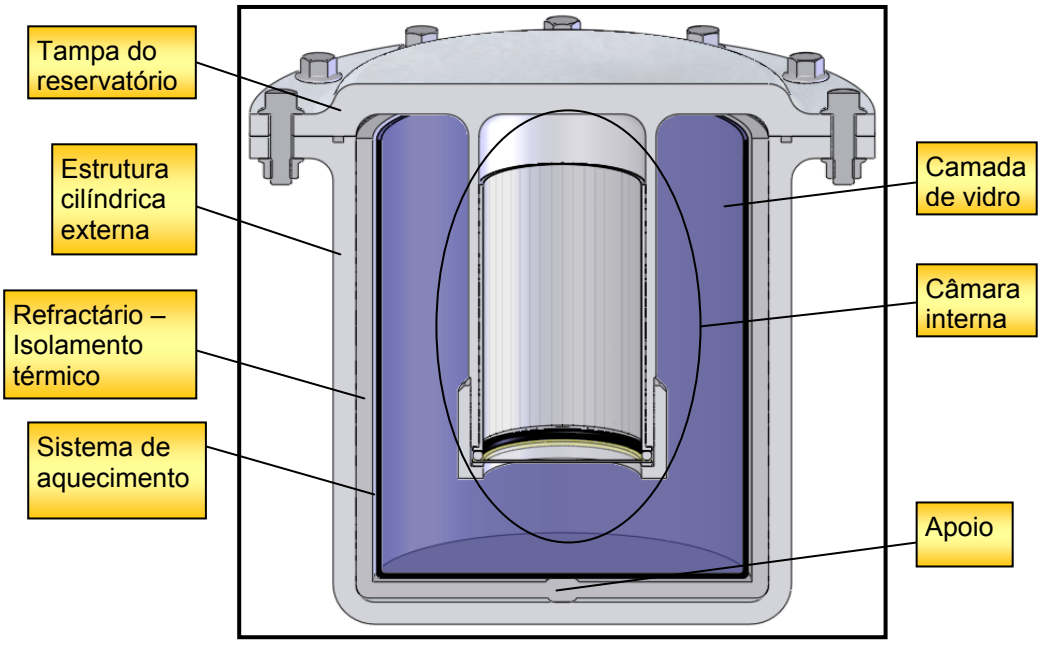


Figura 2.4 – Terceiro conceito para o reactor.

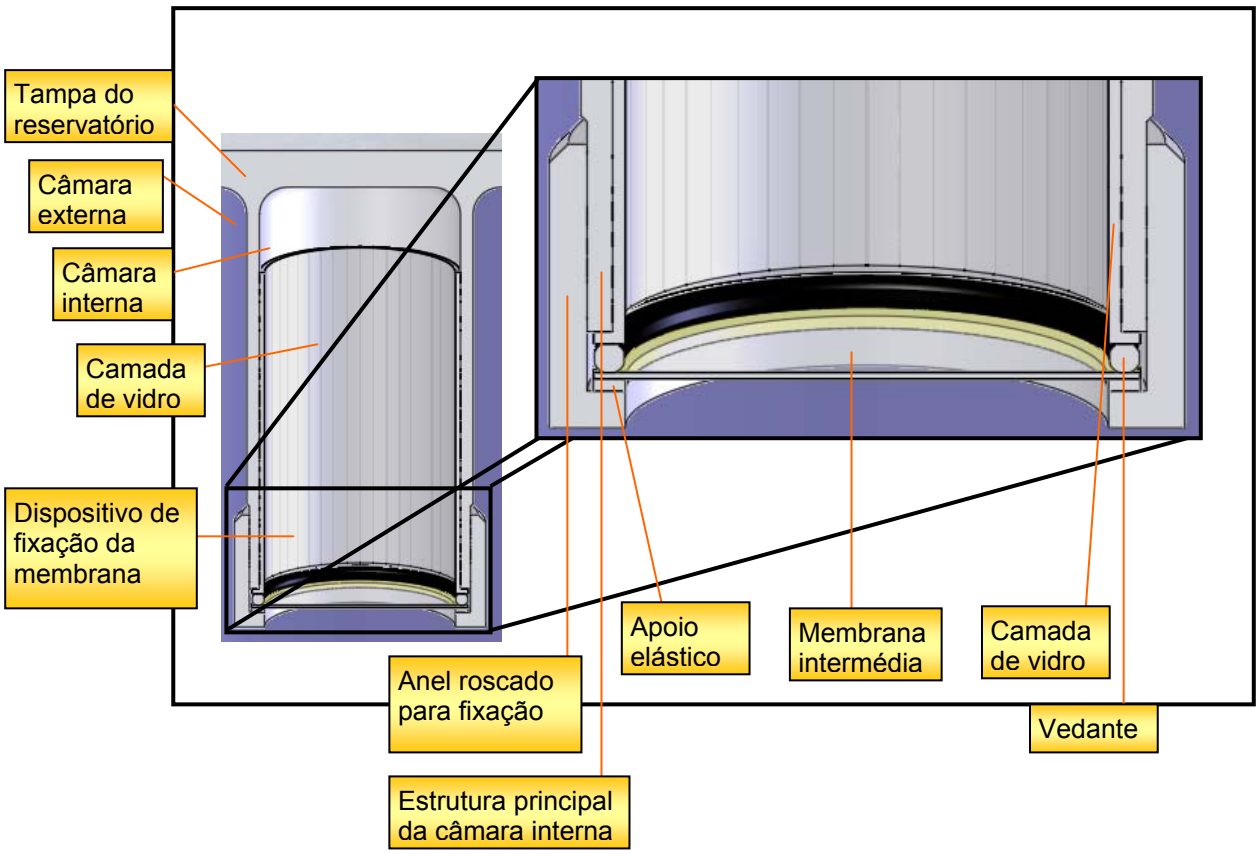


Figura 2.5 – Pormenor da câmara interna no terceiro conceito.

Os problemas que este conceito ostenta, passam pelo facto de, tal como no conceito anterior, existir metal em contacto com os reagentes (o anel roscado e possivelmente a estrutura principal da câmara interna, estariam em contacto com os reagentes da câmara externa). Apesar dos esforços e experiências feitas no sentido de tentar vidrar aço, estas foram sem sucesso, devido à diferença de expansão térmica do aço e o próprio vidro, deitando por terra este conceito. Associando tudo isto ainda o facto de, desta forma, as dimensões da membrana não respeitarem as exigências feitas, a não ser que toda a estrutura do reactor tomasse dimensões algo desproporcionadas e exageradas. Mais ainda, segundo o departamento de Química frisou, esta disposição da membrana iria proporcionar a acumulação de gases na zona da membrana, gases esses que não teriam forma de escape e que iriam obstruir a própria membrana, provocando a cessação da reacção.

É de notar que, na Fig. 2.4 o *Apoio* indicado não é mais do que uma ponto de apoio entre o refractário e o aço, e entre o refractário e o vidro, por forma a que haja um pequeno espaçamento entre estas três camadas, de modo a que, tanto o refractário como o vidro, estejam em equilíbrio de pressão, para que nenhuma destas partes tenha que sustentar as pressões envolvidas no interior do reactor, dada a fraca resistência mecânica destes componentes.

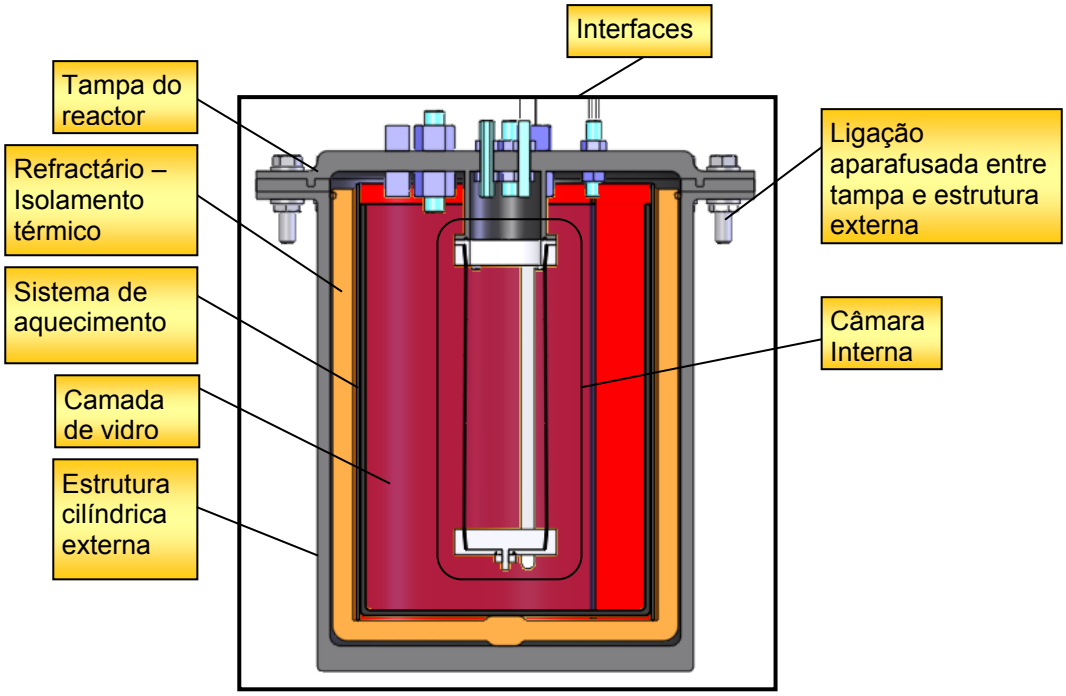


Figura 2.6 – Quarto conceito para o reactor.

O quarto conceito apresentado na Fig. 2.6 é em tudo semelhante ao terceiro conceito, excepto no que toca à concepção do da câmara interna (mostrada em pormenor na Fig. 2.7). Para além disso, mostra já também uma primeira ideia para a constituição dos interfaces (ligações a entradas e saídas de gás, a eléctrodos – mostrado em pormenor na Fig. 2.8 – manómetros de pressão e térmico e sistema de aquecimento).

Na Fig. 2.7, é possível observar mais em por menor a nova concepção, em corte, para a câmara interna do reactor. Como se verifica, a câmara interna é agora composta essencialmente pela membrana intermédia que separa as duas câmaras e por dois dispositivos com uma leve conicidade que, quando assemblados com a membrana, obrigam esta a flectir (visto que a membrana tem uma flexibilidade acentuada) e a ficar retida no meio das duas peças que constituem cada um dos dispositivos. O dispositivo superior fica unido à tampa do reactor através de parafusos feitos do mesmo material do próprio dispositivo e o dispositivo inferior obriga a própria membrana a manter-se na vertical, por gravidade, e é unido entre si através de um perno roscado (existente numa das peças do dispositivo inferior) e de uma porca, cujo material é também igual ao do dispositivo. O material de ambos os dispositivos, trata-se de um material refractário maquinável, capaz de suportar altas temperaturas e tem um comportamento muito aceitável em meios ácidos e básicos, não havendo risco de contaminação dos reagentes, devido à presença deste material, e vice-versa. Além disso, associados a eles existem dois vedantes, apenas para garantir a estanquecidade entre os reagentes. Contudo, este conceito teve que sofrer umas pequenas alterações, devido a algumas dificuldades construtivas, nomeadamente, relacionadas com o dispositivo superior e o sistema de fixação a ele associado. No que respeita à estrutura externa, esta também sofreu algumas alterações, na medida em que, durante o estudo computacional da estrutura, concluiu-se que o raio de concordância

necessário, entre o fundo e a parede lateral, teria que ser da ordem dos 3*cm*, o que levou à alteração do fundo do reactor, optando-se pelo conceito mostrado na Fig. 2.9.

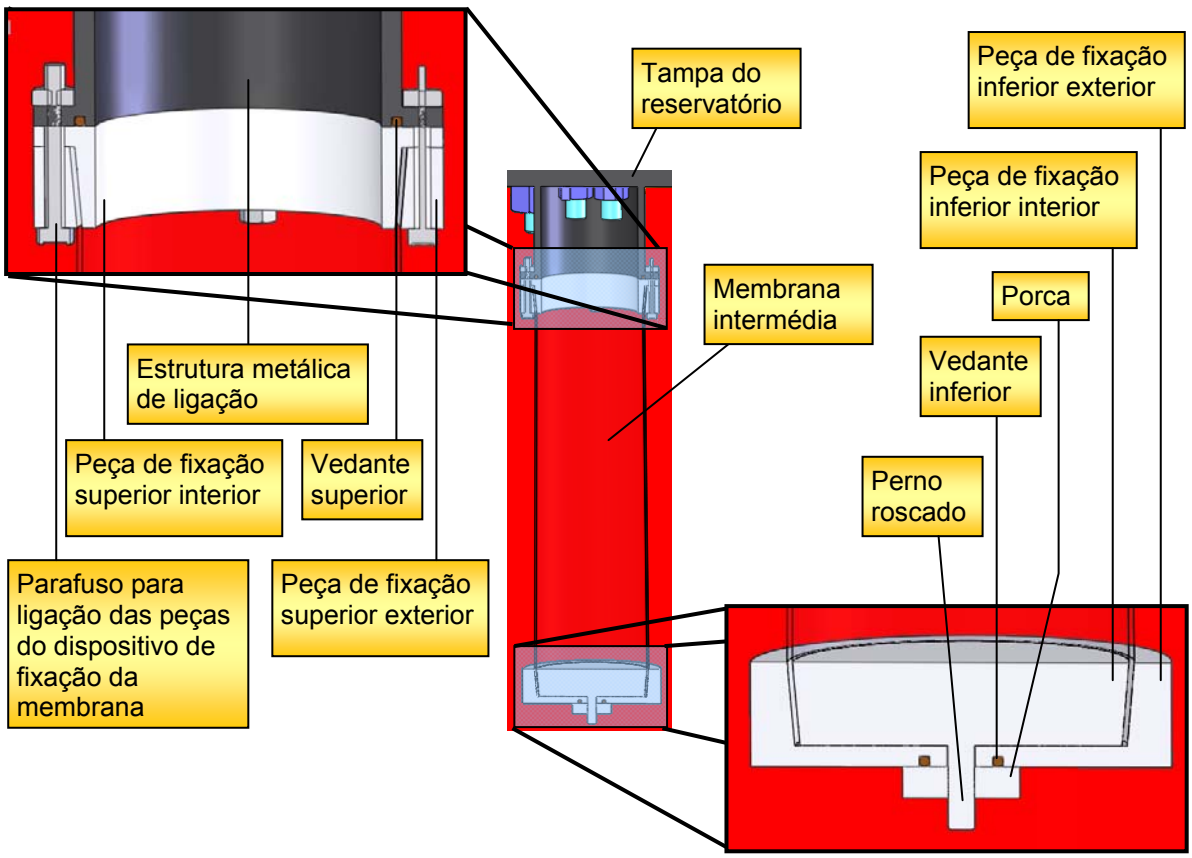


Figura 2.7 – Pormenor da câmara interna no quarto conceito.

A Fig. 2.8 mostra o primeiro conceito gerado para os pernos de ligação e interface alimentação de corrente, para serem utilizados nos eléctrodos e no sistema de aquecimento incluídos no reactor. A ligação eléctrica entre a parte exterior e os componentes no interior do reactor, é feita através de um perno metálico roscado, assemblado à tampa do reactor através de duas porcas e duas anilhas. Anilhas estas, amparadas por um material não condutor (provavelmente um *o-ring*, ou semelhante) e estando o perno também envolto em material não condutor (folha isolante). Tudo isto, para que a estrutura externa do reactor fique isolada da alimentação eléctrica fornecida aos componente internos. No entanto, por motivos relacionados com a ligação eléctrica propriamente dita, estes componentes sofreram pequenas alterações, mostradas nas figuras do quinto e último conceito.

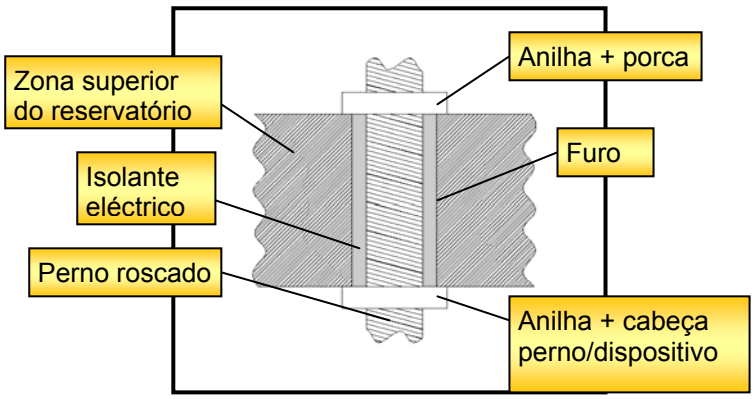


Figura 2.8 – Pormenor das ligações utilizadas no quarto conceito.

Neste quinto e último conceito, estão eliminados todos os problemas e nível estrutural, eléctrico, térmico, químico e funcional. Embora este obrigue ainda à alteração de condições e limitações, que estão mencionadas entre a Tabela 2-2 e a Tabela 2-3, na secção 2.3, este conceito tem a capacidade respeitar todas essas condições.

Na Fig. 2.10, é possível verificar as alterações feitas no sistema que dá origem à câmara interna. Apesar do conceito fundamental ser o mesmo, as diferenças entre esta estrutura e a apresentada na Fig. 2.7 são evidentes. E pode-se observar que foram eliminados os problemas de fixação que existiam no anterior exemplo, através da inovação inserida nesta estrutura.

A Fig. 2.11, mostra também as alterações efectuadas, relativamente à proposta apresentada na Fig. 2.8. A alteração de um perno roscado para um parafuso, igualmente envolto em material isolante, com dois pequenos pernos (um de cada lado da tampa superior do reactor), assemblado à tampa do reactor juntamente com duas anilhas (em aço quando se verifica a condição *1* da Tabela 2-3, ou em refractário quando se verifica a condição *2* da mesma), uma porca de aço e dois vedantes (em compósito quando se verifica a condição *1* da Tabela 2-3, ou em metal quando se verifica a condição *2* da mesma).

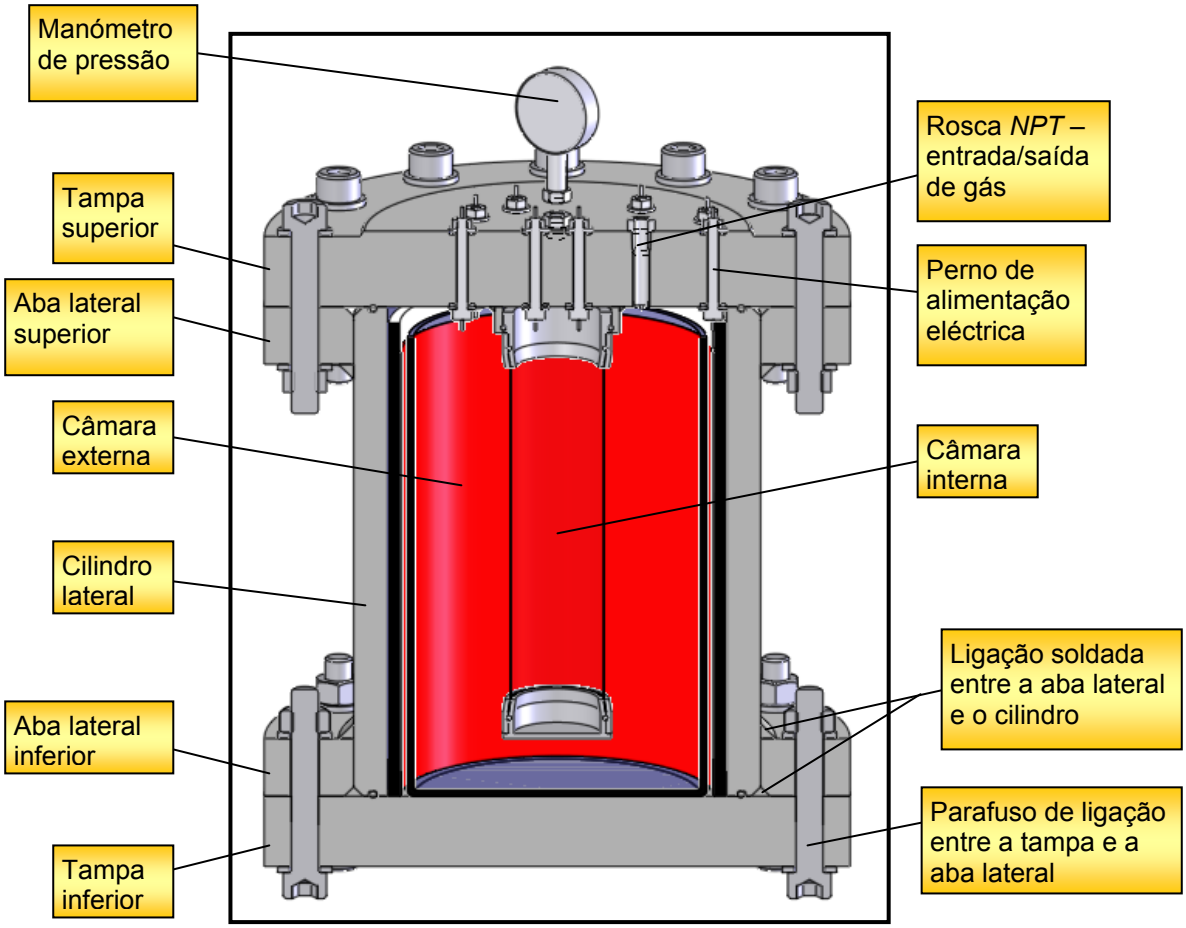

Manómetro de pressão
Tampa superior
Aba lateral superior
Câmara externa
Cilindro lateral
Aba lateral inferior
Tampa inferior
Rosca *NPT* – entrada/saída de gás
Perno de alimentação eléctrica
Câmara interna
Ligação soldada entre a aba lateral e o cilindro
Parafuso de ligação entre a tampa e a aba lateral

Figura 2.9 – Quinto conceito para o reactor.

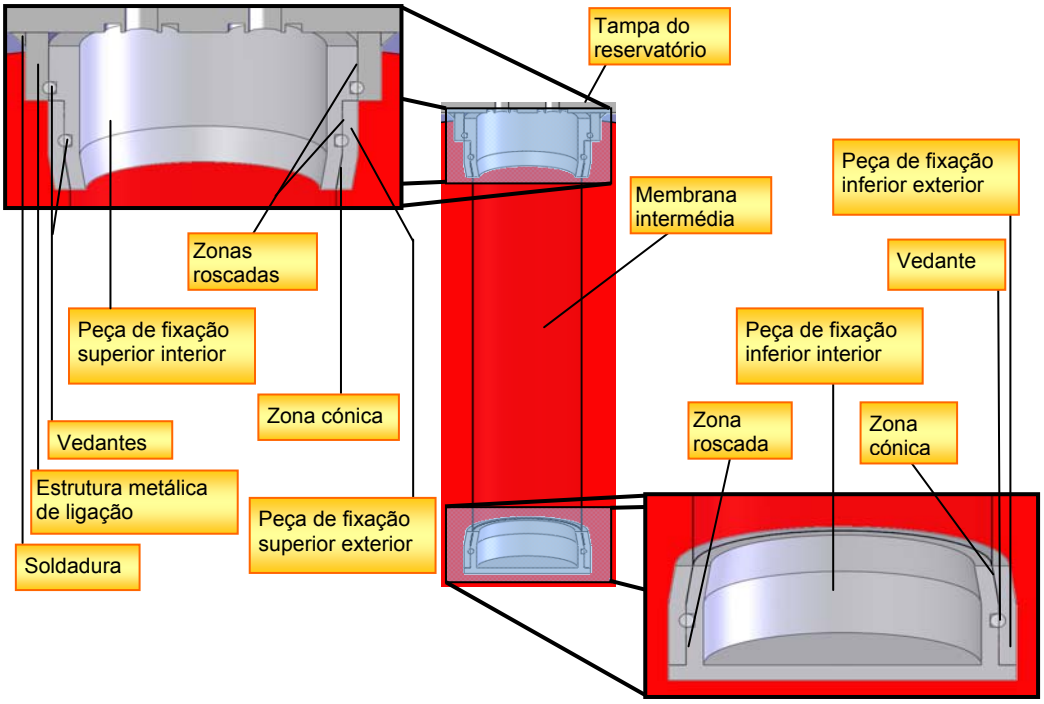


Figura 2.10 – Pormenor da câmara interna no quinto conceito.

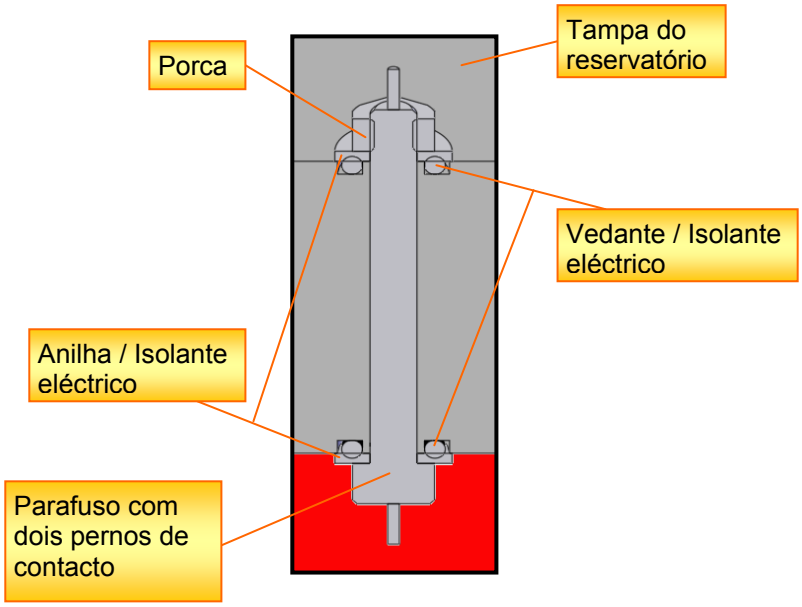


Figura 2.11 – Pormenor das ligações eléctricas utilizadas no quinto conceito.

2.4. Materiais e Componentes

Pesquisar e encontrar todos os materiais necessários ao projecto e produção do reactor desenvolvido neste trabalho foi, sem dúvida, um grande desafio. Materiais esses que, obviamente, conseguissem respeitar todas as condições e limitações impostas.

Em primeiro lugar, no caso da estrutura principal do reactor, foi adoptado inicialmente um aço inoxidável, austenítico, AISI Tipo 304 (ou 303), com um bom comportamento mecânico a altas temperaturas (700º*C*). Segundo a bibliografia [14], desde que a percentagem de crómio seja superior a 12% e/ou austenítico (que é o caso do AISI 304), o aço inoxidável é aplicável em situações que inclusive envolvam a presença de hidrogénio, a temperaturas superiores a 600º*C*, sem que haja risco de criação de metano, nem risco de corrosão. Contudo, neste caso, o fornecimento de material foi uma condicionante com bastante influência. Ou seja, dos fornecedores conhecidos, apenas um possuía tubo de aço inoxidável de grande espessura (destinado à parte cilíndrica da parede lateral do reactor) e varão com os diâmetros pretendidos (para o fabrico das abas e tampas), sendo um requisito a venda deste material a retalho, dados os custos envolvidos. Desta forma, o fornecedor apenas conseguiu disponibilizar aço inoxidável, austenítico também, de tipo 316L. Este aço, comparativamente ao AISI 303 ou 304, tem uma percentagem de crómio ligeiramente inferior (embora acima dos 12%), tem uma tensão de cedência ligeiramente superior e preenche os requisitos pretendidos, tendo sido portanto o material adoptado para a estrutura principal.

No caso do isolamento térmico e eléctrico (material envolvente dos parafusos de ligação eléctrica aos eléctrodos e sistema de aquecimento), foi escolhida uma folha de isolamento com a designação *Superwool 607*, com 2*mm* de espessura. Esta escolha recaiu no facto de ser um material bastante flexível e maleável, tendo também boas propriedades de isolamento.

Para o sistema de aquecimento, foi adoptado um sistema personalizado, constituído por uma resistência aquecimento de tungsténio com 1.5*mm* de diâmetro e cerca de 8 metros de comprimento (comprimento este, necessário para obter um aquecimento suficiente para atingir as temperaturas pretendidas), revestida por uma manga de isolamento eléctrico resistente a alta temperatura. Esta resistência foi bobinada no copo de vidro utilizado e assemblado a este com recurso a uma massa refractária comercial, massa esta que suporta temperaturas até 1500ºC. Para além de ajudar a fixar a resistência ao copo de vidro, esta massa refractária tem também o objectivo de ajudar a manter o calor emitido por efeito de Joule, da resistência, dentro do copo (e, consequentemente, dentro das câmaras do reactor).

O copo de vidro que envolve a câmara externa do reactor, é constituído por um vidro de alto teor de sílica (acima dos 90%), de forma a suportar as temperaturas envolvidas, sem possibilidades de degradação, oferecendo uma boa transmissibilidade de radiação infravermelha entre o sistema de aquecimento e a câmara externa, e sendo neutro no que toca à presença de reagentes no seu interior.

O material utilizado na constituição da câmara interna (dispositivo de fixação da membrana intermédia) e em alguma anilhas de isolamento (no caso de não existir pressão e terem-se altas temperaturas), é constituído por um material refractário maquinável. A sua designação é *Macor*® e tem uma boa maquinabilidade, ao ponto de permitir a produção de peças de elevada complexidade (peças roscadas, engrenagens, etc.) com ferramentas usualmente utilizadas para maquinar metais, para além do facto de ter uma resistência térmica bastante elevada e de ter um bom comportamento numa gama muito variada de meios (ácidos e/ou básicos). A sua resistência mecânica, é bastante baixa relativamente ao aço, mas tendo em conta que, em termos de esforços, este material será muito pouco solicitado, esta característica não é um problema.

Os pernos para contacto eléctrico (mostrados na Fig. 2.11) são, tal como a estrutura principal, constituídos por aço tipo 316.

Relativamente aos parafusos de ligação entre as tampas e o cilindro que constituem a estrutura principal do reactor, são parafusos em aço (ou aço inoxidável, no caso de alta temperatura), classe 12.9 (ou A4, no caso de alta temperatura). As anilhas e porcas correspondentes, são igualmente constituídas por aço ou aço inoxidável.

No que diz respeito a vedantes, estes são constituídos por *Viton* (no caso de temperaturas até os 200~250º*C*) ou por cobre (no caso de temperaturas até 700º*C*)

Por fim, em termos de acessórios (machos *NPT*, ligações de porta, redutores, manómetros de pressão e de temperatura, válvulas e válvula de segurança, etc.), são todos constituídos por aço inoxidável, sendo também todos (à excepção do termopar, que foi feito por encomenda) da marca *Swagelok*.

Todas as características ou especificações dos materiais e acessórios utilizados e dos fornecedores desses mesmos materiais, estão descritas nos anexos *A.1. Especificações dos Materiais e Instrumentos Utilizados* e *A.2. Fornecimento*.

Na tabela seguinte, estão então listados todos os materiais e acessórios utilizados na construção do reactor:

Materiais e Componentes		
Material	**Dimensões [*mm*]**	**Finalidade**
Aço 316L	Varão – Ø220x160	Tampas e abas
Aço 316L	Tubo – (Øint-125 Øext-150)x195	Cilindro/parede lateral
Superwool 607	Folha – 2000x610x2	Isolamento térmico e eléctrico
Resist. Tungsténio	Varão – Ø1.5x8000	Sistema de aquecimento
Vidro (sílica ~90%)	Copo - (Øint-106 Øext-110)x175	Acomodar reagentes na câmara externa
Macor®	Varão – Ø40x130	Sistema de fixação da membrana e anilhas

Acessórios			
Qt.	**Componente**	**Marca**	**Ref.ª**
24+24	Parafusos	n/d	M12x1.75:12.9/M12x1.75:A4
8	Parafusos	n/d	M4
24+24	Porcas	n/d	M12x1.75:12.9/M12x1.75:A4
8	Porcas	n/d	M4
48+48	Anilhas	n/d	M12 – Aço/Aço Inox
8	Anilhas	n/d	M4
2+2	Vedantes	n/d	I.D.133*mm* x W.2.6*mm* – *Viton*/Cobre
1+1	Vedante	n/d	I.D.38*mm* x W.2.6*mm* – *Viton*/Cobre
2+2	Vedantes	n/d	I.D.34*mm* x W.2.6*mm* – *Viton*/Cobre
16	Vedantes	n/d	I.D. 3*mm* x W.2*mm* – *Viton*/Cobre
16	Vedantes	n/d	I.D. 3*mm* x W.1*mm* – *Viton*/Cobre
4	Machos *NPT*	Swagelok	SS-100-1-4
5	Ligações de Porta	Swagelok	SS-401-PC
2	Válvulas	Swagelok	SS-62XPS4
1	Tê	Swagelok	SS-400-3-4TFT
1	Válvula de Segurança	Swagelok	SS-4R3A
1	Mola para Válvula	Swagelok	177-R3A-K1-D
1	Manómetro de Pressão	Swagelok	PGI-63B-BG250-LAQX
1	Manómetro de Temperatura	n/d	Termopar tipo *J* – personalizado; feito em aço inoxidável

Tabela 2-4 – Discriminação dos Materiais e Componentes Utilizados.

3. ANÁLISE DE COMPORTAMENTO: MÉTODO ANALÍTICO

3.1. Introdução

Este capítulo inicia-se com a descrição do método analítico utilizado no estudo do vaso, onde é explorado o seu fundamento e feita a análise do vaso propriamente dito. Para além disso, é também efectuado, exclusivamente neste capítulo, o projecto analítico relativamente às ligações aparafusadas utilizadas na união entre as tampas e o cilindro que constituem a estrutura externa do reactor, bem como, o projecto analítico das ligações soldadas que unem as abas, aparafusadas às tampas, ao cilindro externo da estrutura principal do reactor. Na análise do vaso, é feito o dimensionamento do mesmo, recorrendo à revisão bibliográfica efectuada na secção 1.3. Dimensionamento este que, leva a um determinado comportamento do material e que, mais à frente na presente dissertação, nomeadamente no capítulo 6, será confrontado com os resultados obtidos na Análise Computacional e na Análise Experimental.

3.2. Método Analítico

O método analítico utilizado no estudo do vaso sujeito a alta pressão e alta temperatura, teve como base teórica aquela que está descrita nas secções 1.3.2 e 1.3.3 desta dissertação.

No caso das tampas do reactor, foram utilizados os fundamentos [5] sobre *Placas Planas*, nomeadamente, sobre *Flexão de Placas Planas com Condições de Fronteira Circulares*, que resumidamente diz que a tensão equivalente, no caso de uma placa simplesmente apoiada, é dada pela Eq. (1.33), tendo como base o momento determinado pela a Eq. (1.32). Para a determinação das componentes das tensões principais nas tampas, em pontos específicos (no centro da tampa e na fronteira da mesma), tem-se por base a Eq. (1.39), que é sustentada pelas Eqs. (1.35) e (1.38). Por fim, no que respeita a tensões térmicas na zona da tampa, foi considerada a Eq. (1.41) para a sua determinação.

No caso da zona cilíndrica do reactor, esta foi estudada e dimensionada, tendo por base a teoria de *Cascas de Revolução, Vasos de Pressão e Tubos*, onde as Eqs. (1.28), (1.30) e (1.31) determinam as componentes da tensão equivalente máxima a que o cilindro está sujeito, sendo que esta é determinada através do princípio de tensão equivalente de *Von Mises*, tendo sido este o método utilizado para o cálculo da tensão equivalente na maioria das situações, no presente trabalho.

Para além disso e como já foi mencionado, exclusivamente neste capítulo está demonstrado o projecto de ligações aparafusadas e soldadas, utilizadas no reactor. Esses projectos seguiram os fundamentos referidos [1], que são descritos em seguida.

3.2.1. Projecto de Ligações Aparafusadas

Dada a complexidade por vezes existente em certas estruturas, é necessário que estas sejam processadas e fabricadas por partes, exigindo posteriormente a assemblagem das várias partes recorrendo a ligações. O projecto de ligações é extremamente importante, dada a possibilidade de estarem em risco vidas humanas e bens materiais.

No caso do presente trabalho, o projecto de ligações aparafusadas, estuda as uniões entre as duas tampas do reactor e o corpo cilíndrico situado entre elas, sendo dimensionadas essas mesmas ligações.

Visto tratarem-se de ligações axissimétricas, de corpos igualmente axissimétricos, sujeitos a cargas uniformemente distribuídas, é possível afirmar à partida que a charneira do sistema, teoricamente, não se situa num ponto, mas sim na linha da fronteira das placas (tampas) e das abas, considerando que o material é perfeitamente axissimétricos, homogéneo e isotrópico.

É de notar ainda que, devido às cargas térmicas também associadas e dada a falta de informação neste sentido, relativamente a ligações aparafusadas, todo o projecto foi efectuado considerando parafusos de classe 8.8. Posteriormente foram verificados os factores de segurança associados a parafusos de classe 12.9 sujeitos às mesmas condições, visto que, de facto, essa foi classe de parafusos utilizada na assemblagem do reactor.

A Fig. 2.9 mostra o conceito utilizado no projecto do reactor. Dessa forma, é possível verificar que, em condições de pressão máxima no interior do reactor (10*MPa*) e desprezando a pressão ambiente no exterior do reactor (0.1*MPa*), a carga na zona das tampas é perpendicular a esta e uniformemente distribuída (não considerando a presença dos furos, na tampa superior). Assim sendo, e tendo em conta que o diâmetro interior do vedante que se encontra entre as tampas e as abas é de 143*mm* (que será a dimensão de referência, que limita a área de acção da pressão sobre a tampa do reactor), a força normal a que cada tampa está sujeita é dada por:

$$N = pA_{tampa} = 10\times10^{6}\times\left(\pi 0.0715^{2}\right) = 160.6kN \tag{3.1}$$

Sendo que o esforço normal a que cada um dos parafusos ficará sujeito é dado por:

$$F_e = \frac{N}{n^{o}\ de\ parafusos} \tag{3.2}$$

Este valor é portanto dependente do número de parafusos utilizados. Para se chegar ao dimensionamento da ligação aparafusada, foi necessário efectuar algumas iterações com vários valores para o parâmetro de rigidez C_k, até que se chegou ao valor estimado de $C_k = 0.1$, através da determinação das espessuras equivalentes e das constantes de rigidez do sistema k_b e k_j. Através

do estudo realizado, verificou-se também que o número de parafusos a utilizar, para este valor de C_k , situa-se entre os 10 e os 14 parafusos. Sabendo que carga de pré-tensão é dado por:

$$F_i = n_s(1 - C_k)F_e \tag{3.3}$$

em que o esforço transverso é desprezado, dada a grande resistência mecânica da parede lateral relativamente à pressão exercida sobre ela, resultar numa força de corte desprezável nos parafusos, relativamente ao esforço normal. Assim, na Tabela 3-1, têm-se os valores do esforço normal e a carga de pré-tensão, para o número de parafusos determinado:

N.º Parafusos	F_e [kN]	F_i [kN]
10	16.1	36.9
12	13.4	30.7
14	11.5	26.3

Tabela 3-1 – Esforço Normal e Carga de Pré-Tensão.

Sabendo à partida que esta se trata de uma junta amovível, considera-se que $F_i^* = 0.75P_p$, onde P_p é a carga de prova, e tendo em conta que este projecto está a ser efectuado tendo em consideração uma classe de parafusos 8.8, é possível recorrer à Fig. 3.1 para determinar as dimensões dos parafusos a utilizar, através do valor da carga de prova de uma junta amovível F_i^* , imediatamente superior ao valor da carga de pré-tensão.

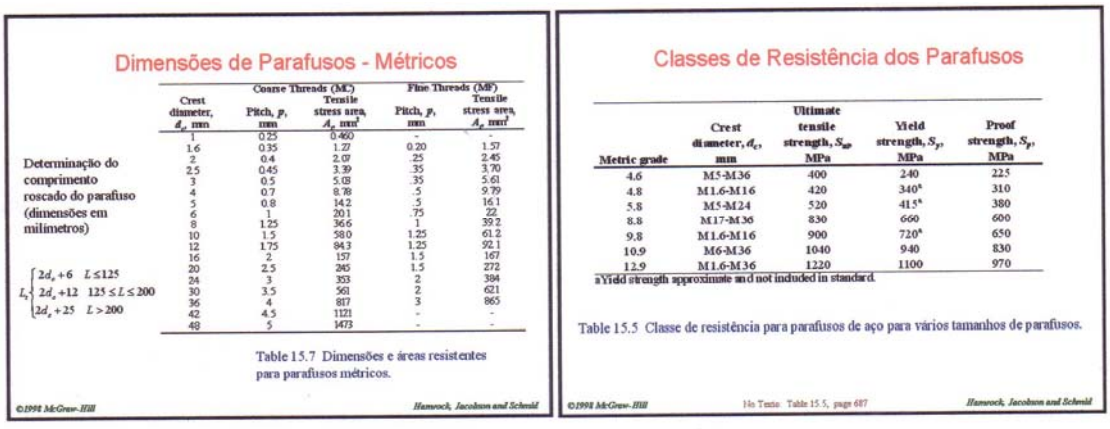

Dimensões de Parafusos - Métricos
Coarse Threads (MC)
Fine Threads (MF)
Crest diameter, d_c, mm
Pitch, p, mm
Tensile stress area, A_s, mm²
Pitch, p, mm
Tensile stress area, A_s, mm²
1 0.25 0.460 - -
1.6 0.35 1.27 0.20 1.57
2 0.4 2.07 .25 2.45
2.5 0.45 3.39 .35 3.70
3 0.5 5.03 .35 5.61
4 0.7 8.78 .5 9.79
5 0.8 14.2 .5 16.1
6 1 20.1 .75 22
8 1.25 36.6 1 39.2
10 1.5 58.0 1.25 61.2
12 1.75 84.3 1.25 92.1
16 2 157 1.5 167
20 2.5 245 1.5 272
24 3 353 2 384
30 3.5 561 2 621
36 4 817 3 865
42 4.5 1121 - -
48 5 1473 - -
Determinação do comprimento roscado do parafuso (dimensões em milímetros)
$L_t \begin{cases} 2d_c + 6 & L \le 125 \\ 2d_c + 12 & 125 \le L \le 200 \\ 2d_c + 25 & L > 200 \end{cases}$
Table 15.7 Dimensões e áreas resistentes para parafusos métricos.
©1998 McGraw-Hill
Hamrock, Jacobson and Schmid
Classes de Resistência dos Parafusos
Metric grade
Crest diameter, d_c, mm
Ultimate tensile strength, S_u, MPa
Yield strength, S_y, MPa
Proof strength, S_p, MPa
4.6 M5-M36 400 240 225
4.8 M1.6-M16 420 340[a] 310
5.8 M5-M24 520 415[a] 380
8.8 M17-M36 830 660 600
9.8 M1.6-M16 900 720[a] 650
10.9 M6-M36 1040 940 830
12.9 M1.6-M36 1220 1100 970
[a]Yield strength approximate and not included in standard.
Table 15.5 Classe de resistência para parafusos de aço para vários tamanhos de parafusos.
©1998 McGraw-Hill
No Texto: Table 15.5, page 687
Hamrock, Jacobson and Schmid

Figura 3.1 – Tabelas das dimensões e áreas resistentes para parafusos métricos e classe de resistência para parafusos de aço.

Desta forma, pela Tabela 3-2 é possível verificar as dimensões dos parafusos, para cada um dos casos:

N.º Parafs.	A_t [mm^2]	σ_p [MPa]	P_p [kN]	F_i^* [kN]	Dimensões
10	84.3	600	50.6	37.9	**M12x1.75**
12					**M12x1.75**
14					**M12x1.75**

Tabela 3-2 – Dimensões dos Parafusos.

O comprimento dos parafusos depende, obviamente, das espessuras da tampa e da aba, que são respectivamente $e_{tampa} = 26.9mm$ e $e_{aba} = 22mm$. Assim, o comprimento total é dado por:

$$L = \left(e_{tampa} + e_{aba}\right) + d_c/2 = \left(26.9 + 22\right) + 12/2 = 54.9mm \tag{3.4}$$

onde d_c é o diâmetro de crista. Sendo que o valor não é um valor standard e tendo em conta também que a esta dimensão terão que ser somadas a espessuras de duas anilhas e uma porca, o comprimento adoptado para os parafusos é de $L = 70mm$. Sabe-se que os parafusos disponíveis pelo fornecedor, são parafusos de rosca parcial (parafusos roscados ao longo de parte do seu comprimento), portanto, tem-se que o comprimento da parte roscada do parafuso é igual a $L_t = 2D + 6 = 2 \times 12 + 6 = 30mm$ e que o comprimento da parte não roscada é igual é zero $L_s = L - L_t = 70 - 30 = 40mm$. Desta forma, os comprimentos equivalentes, são iguais a:

$$L_{t_{eq}} = L_t + 0.4d_r = L_t + 0.4\left(d_c - 1.0825p\right) = 36.4mm \tag{3.5}$$

$$L_{s_{eq}} = L_s + 0.4d_c = 44.8mm \tag{3.6}$$

onde, d_r é o diâmetro de raiz, d_c é o diâmetro crista e p é o passo do parafuso. Consequentemente, a rigidez do parafuso vem:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{4}{\pi E}\left(\frac{L_{s_{eq}}}{d_c^2} + \frac{L_{t_{eq}}}{d_r^2}\right) \quad \Rightarrow \quad k_b = 572.3\,MN/m \tag{3.7}$$

onde se considerou $E = 203GPa$. Para determinar a rigidez da junta, é necessário identificar os troços em que se divide o cone de pressão, na junta, mostrado na Fig. 3.2:

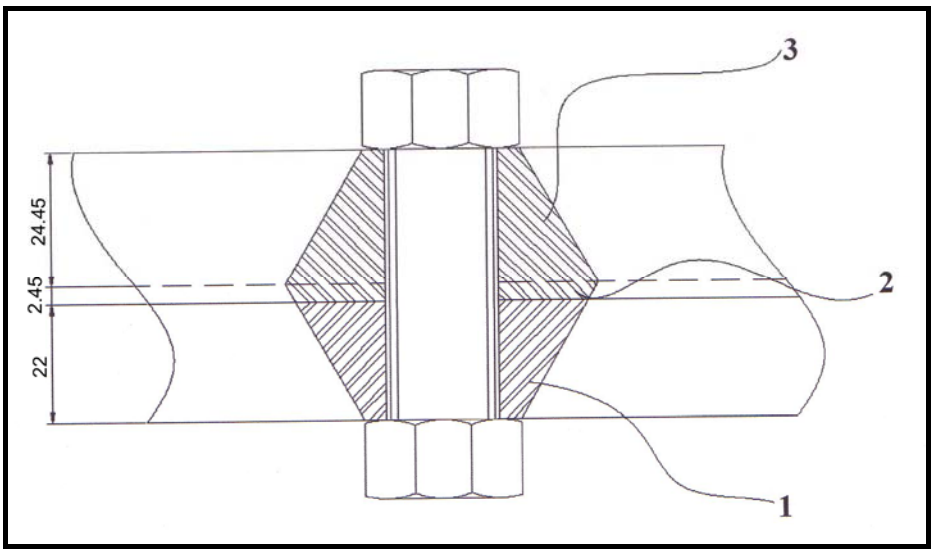


Figura 3.2 – Troços do cone de pressão.

Sendo a rigidez da junta, em cada um dos troços, igual a:

$$k_{ji} = \frac{\pi E d_c \tan\alpha}{\ln\left[\dfrac{\left(2L_i \tan\alpha + d_i - d_c\right)\left(d_i + d_c\right)}{\left(2L_i \tan\alpha + d_i + d_c\right)\left(d_i - d_c\right)}\right]} = \begin{cases} k_{j1} = 4.24\,GN/m \\ k_{j2} = 14.92\,GN/m \\ k_{j3} = 4.10\,GN/m \end{cases} \tag{3.8}$$

onde, L_i é o comprimento do troço i, α é o ângulo que o cone de pressão faz com a vertical e é igual a 30º, e onde d_i é o diâmetro da cabeça do parafuso, sendo igual a $d_i = 1.5 d_c = 18mm$. Assim, resulta que a rigidez total da junta é:

$$\frac{1}{k_j} = \frac{1}{k_{j1}} + \frac{1}{k_{j2}} + \frac{1}{k_{j3}} \Rightarrow k_j = 1.83\,GN/m \tag{3.9}$$

Por fim, C_k é então igual a:

$$C_k = \frac{k_b}{k_b + k_j} = 0.13 \tag{3.10}$$

Portanto, a aproximação de $C_k = 0.1$ em nada vai alterar o resultado final, pois $F_i = n_s(1 - C_k)F_e = (10\,parafusos \rightarrow 37.6kN);(12\,parafusos \rightarrow 31.3kN);(14\,parafusos \rightarrow 26.8kN)$, ou seja, o valor de F_i^* continua a ser superior a F_i, sendo então que, o coeficiente de segurança real, para os três casos (10, 12 e 14 parafusos), é respectivamente igual a:

$$n_{real} = \frac{F_i^*}{F_i / n_s} = \begin{cases} 2.57 \\ 3.08 \\ 3.61 \end{cases} \tag{3.11}$$

Visto isto, seria de considerar à partida que, o número de parafusos a adoptar seria de 14 parafusos M12x1.75, por comparação dos coeficientes de segurança reais. Contudo, dada a importância da ligação em termos de risco de vidas humanas e de impacto económico, e dada a condição imposta pelo *REAE* (Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios) que diz que os parafusos deverão estar afastados entre si, pelo menos, uma distância equivalente a três vezes o seu diâmetro, o facto de se terem 14 parafusos em cada uma das tampas, não respeitaria esta regras, devido à dimensões da própria junta e disposição dos respectivos parafusos, como se poderá constatar na secção 3.3. Portanto, o número de parafusos a adoptar será de 10 ou 12.

Segurança Contra Separação na Junta

Com as condições anteriormente estabelecidas, a carga aplicada na junta, é expressa por:

$$F_j = F_i - (1 - C_k)F_e = \begin{cases} 10\,parafusos : 22.8kN \\ 12\,parafusos : 19.0kN \end{cases} \tag{3.12}$$

Por aqui, é também possível determinar o valor de F_e quando a força na junta F_j é nula:

$$F_e^* = F_{e(F_j=0)} = \frac{F_i}{1 - C_k} = \begin{cases} 10\,parafusos : 40.9kN \\ 12\,parafusos : 34.0kN \end{cases} \tag{3.13}$$

Assim, o coeficiente de segurança contra a separação na junta, pode ser determinado:

$$n_{sep.junta} = \frac{F_e^*}{F_e} = \begin{cases} 10\,parafusos : 2.54 \\ 12\,parafusos : 2.54 \end{cases} \tag{3.14}$$

Segurança à Cedência

Partindo do cálculo do diâmetro primitivo dos parafusos:

$$d_p = d_c - 0.65p = 10.86mm \tag{3.15}$$

é possível chegar ao valor do ângulo α (não se refere ao ângulo do cone de pressão com a vertical),

$$\alpha = \arctan\left[\frac{p}{\pi\left(d_c - 0.65p\right)}\right] = \arctan\left(\frac{p}{\pi d_p}\right) = 2.94^{\circ} \tag{3.16}$$

de onde é então possível determinar os binários na rosca, de atrito na rosca e total de aperto, para os casos de 10 e 12 parafusos. Tem-se então, respectivamente:

$$T_{rosca} = F_i \frac{d_p}{2} \frac{\mu + \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\tan\alpha}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) - \mu\tan\alpha} = \begin{cases} 10\,parafusos : 25.4N.m \\ 12\,parafusos : 21.1N.m \end{cases} \tag{3.17}$$

$$T_{at.porca} = \mu F_i r_{eq.atrito} = \mu F_i \frac{1}{2}\left(\frac{d_c + 1.5d_c}{2}\right) = \begin{cases} 10\,parafusos : 12.5N.m \\ 12\,parafusos : 10.4N.m \end{cases} \tag{3.18}$$

$$T_{Total} = T_{rosca} + T_{at.porca} = \begin{cases} 10\,parafusos : 37.9N.m \\ 12\,parafusos : 31.5N.m \end{cases} \tag{3.19}$$

onde se considerou o coeficiente de atrito $\mu = \frac{\cos\theta_n}{\tan\alpha} = \frac{\cos\left(\arctan\left(\cos\alpha \times \tan\beta/2\right)\right)}{\tan\alpha} = 0.044$ e o ângulo para roscas métricas $\beta = 60^{\circ}$. As componentes da tensão, sentidas nos parafusos durante o aperto, são:

$$\sigma = \frac{F_i}{A_t} = \begin{cases} 10\,parafusos : 446.0MPa \\ 12\,parafusos : 371.3MPa \end{cases} \tag{3.20}$$

$$\tau = \frac{T_{rosca}}{\omega} = \frac{16T_{rosca}}{\pi d_r^3} = \begin{cases} 10\,parausos : 125.3MPa \\ 12\,parafusos : 104.1MPa \end{cases} \tag{3.21}$$

donde se pode determinar a tensão equivalente, utilizando o critério de *Von Mises*:

$$\sigma_{eq.V.M.} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \begin{cases} 496.0MPa \\ 412.8MPa \end{cases} \tag{3.22}$$

Por fim, o coeficiente de segurança inerente aos parafusos, relativamente à tensão de cedência do material dos parafusos (classe 8.8), é igual a:

$$n_{ced} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{eq.V.M.}} = \frac{660MPa}{\sigma_{eq.V.M.}} = \begin{cases} 10\,parafusos : 1.33 \\ 12\,parafusos : 1.60 \end{cases} \tag{3.23}$$

Desta forma, dadas as circunstâncias, optou-se pelo número de parafusos que oferece maior segurança no aperto (12 parafusos). Embora o seu valor seja superior a 1, isso não invalida a segurança de todo o sistema, dado que o instante do aperto é relativamente curto e raro. Para além disso, existem coeficientes de segurança aplicados anteriormente, que evidenciam a influência de n_{ced}.

Verificação da Segurança Associada a Parafusos de Classe 12.9

Tal como foi dito anteriormente, todo o projecto demonstrado, foi efectuado considerando parafusos de classe 8.8. É então agora altura de verificar os factores de segurança associados a parafusos de classe 12.9 sujeitos às mesmas condições, visto que, de facto, essa é a classe de parafusos utilizada na assemblagem do reactor.

Através da Fig. 3.1, é possível obter os valores correspondentes de tensão de prova e tensão de cedência dos parafusos de classe 12.9. Desta forma, o coeficiente de segurança real para o caso de 12 parafusos, M12x1.75, classe 12.9, é igual a:

$$n_{real} = \frac{F_i^*}{F_i / n_s} = \frac{0.75\sigma_p A_t}{F_i / n_s} = \frac{0.75 \times 970 \times 10^6 \times 84.3 \times 10^{-6}}{31300/2.55} = 5.00$$

O coeficiente de segurança contra a separação da junta, mantém-se igual ao anterior $n_{sep.junta} = 2.54$, ao passo que o coeficiente de segurança dos parafusos à cedência, altera-se para:

$$n_{ced} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{eq.V.M}} = \frac{1100 \times 10^6}{412.8 \times 10^6} = 2.66$$

Como se verifica, com parafusos de classe 12.9 e dadas as condições a que estes estão sujeitos, os coeficientes de segurança a eles associados são bastante generosos, assegurando um bom e longo funcionamento dos mesmos.

3.2.2. Projecto de Ligações Soldadas

Numa fase inicial, é necessário proceder ao estudo das forças e momentos aplicados na aba do cilindro, por forma a conhecer as contribuições de cada um em toda a estrutura. Na Fig. 3.3 está representado um esquema simples das aplicada na aba do cilindro, quando esta está soldada ao próprio cilindro. A força F não é mais do que a contribuição do esforço feito pela totalidade dos parafusos. É aqui assumido que a força é uniformemente distribuída ao longo de uma linha concêntrica com o cilindro, o que, na realidade, não é o que acontece, devido ao facto de os parafusos terem um espaçamento entre eles, tratando-se portanto de uma aproximação. Esta força, é fundamentada na pressão interna exercida sobre a tampa, que por sua vez é transmitida aos parafusos,

$$F = \pi r^2 p = \pi \times 0.0715^2 \times 10 \times 10^6 = 160.6kN \tag{3.24}$$

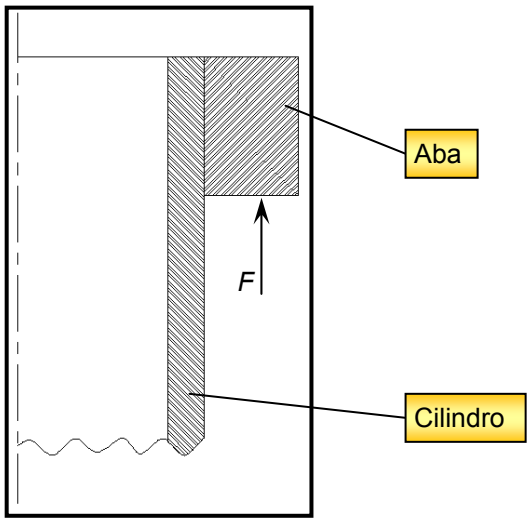


Figura 3.3 – Esquematização da força envolvida.

Antes do estudo das solicitações a que a estrutura está sujeita, é necessário determinar alguns parâmetros. Visto que a ligação soldada da aba, inclui a soldadura desta em todo o perímetro do seu diâmetro interno, superior e inferior, então por via do esquema apresentado na Fig. 3.4, é possível determinar a área efectiva da soldadura e o momento de inércia por unidade de área.

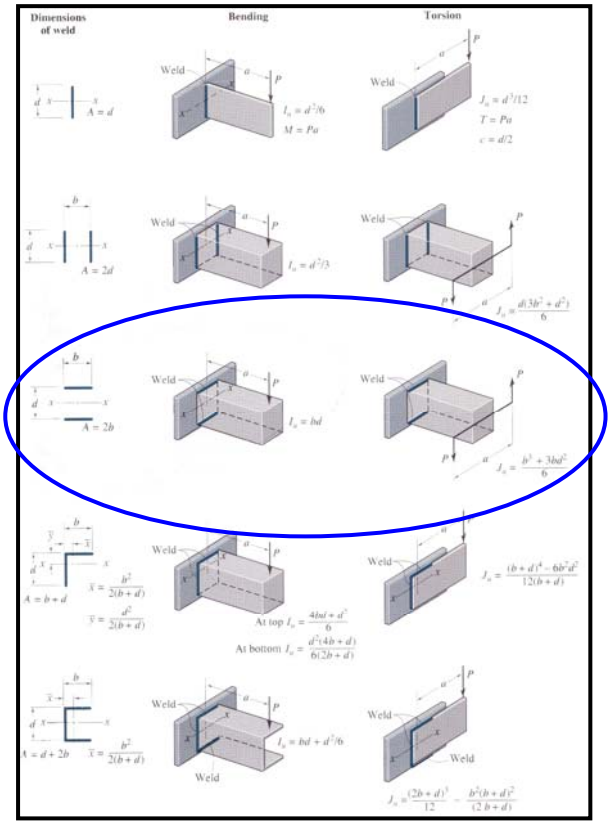


Figura 3.4 – Geometria de soldaduras e parâmetros usados tendo vários tipos de cargas.

Através da geometria, percebe-se que o comprimento da ligação soldada L_w, será igual a duas vezes (soldadura nas partes inferior e superior da aba) o perímetro externo do cilindro, ou seja,

$$L_w = 2\left(2\pi r_{ext}\right) = 2\left(2\pi 0.075\right) = 0.94m \tag{3.25}$$

Nota: as dimensões até agora consideradas, para raios e espessuras das tampas e abas, bem como, os raios interno e externo do cilindro, são retirados da secção 3.3, onde é dimensionada a estrutura principal.

Sabe-se que a tensão de corte a que a soldadura está sujeita [1], é dada por:

$$\tau = \frac{F}{tL_w} = \frac{F}{\sin 45^o\, hL_w} = \frac{2.41\times 10^5}{h} \quad Pa \tag{3.26}$$

onde t e h são as dimensões do cordão, esquematizadas na Fig. 3.5.

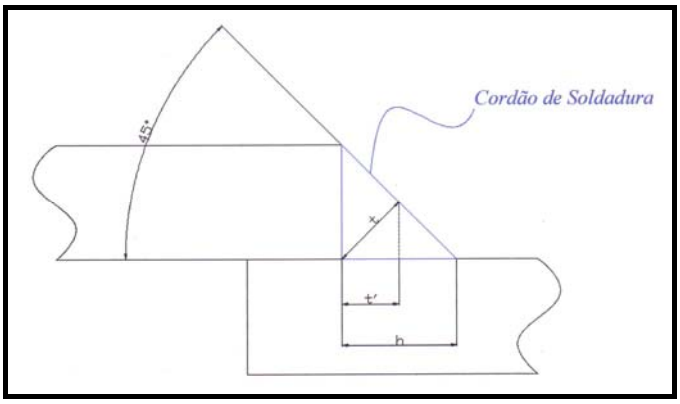


Figura 3.5 – Esquematização das dimensões do cordão de soldadura.

O momento de inércia I, é expresso por:

$$I = tI_u L_w = (\sin 45^o\, h)(bd)L_w = \sin 45^o\, h\left(\frac{L_w}{2}e\right)L_w = 6.91\times10^{-3}\, h \quad m^4 \tag{3.27}$$

em que b e d são parâmetros geométricos. O momento flector sofrido pelo cordão de soldadura, originado pela força aplicada na aba, é:

$$M = F \times a = 160606(0.095 - 0.075) = 3212.1 N.m \tag{3.28}$$

onde a é o braço (distância entre o ponto onde a força está aplicada e o cordão de soldadura). A partir deste valor é então possível determinar a tensão normal,

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{5113.4}{h} \tag{3.29}$$

onde c é igual a metade da espessura da aba. A tensão normal, terá a configuração que está esquematizada, a vermelho, na Fig. 3.6:

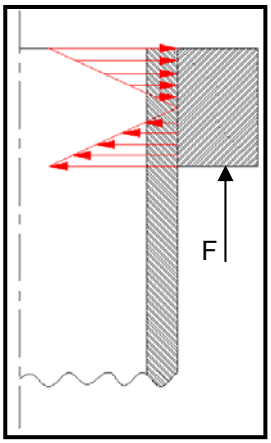


Figura 3.6 – Configuração da tensão normal, na zona do cordão.

Visto isto, com as tensões normal e de corte do sistema determinadas, recorrendo ao critério de *Von Mises* e tendo em consideração, novamente, um coeficiente de segurança igual a 2.55, pode-se chegar à geometria do cordão de soldadura:

$$\frac{\sigma_{ced}}{n_s} = \frac{206\times10^6}{2.55} = 80.4\times10^6 = \sigma_{adm} = \sigma_{eq\cdot V.M.} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \Rightarrow h = 5.2mm \quad (3.30)$$

Existe uma consideração a ter em conta, mencionada pelo REAE, relativamente ao dimensionamento do cordão de soldadura. Dado que os elementos a ligar têm faces de soldadura que formam um ângulo de 90º (ou seja, segundo o REAE, que está compreendido entre os 60º e os 120º), considera-se que o cordão de soldadura a implementar será do tipo soldadura de ângulo, que o REAE impõe que deve ter uma espessura superior a 3*mm* e inferior a 0.7 vezes a menor espessura dos elementos a ligar. Neste caso, deverá ser 0.7 vezes a espessura do cilindro, isto é:

$$3mm < t < 0.7*12.5 = 8.4mm \quad (3.31)$$

O que realmente se verifica, dado que $t = \sin 45º\, h = 3.7mm \Rightarrow 3mm < t < 8.4mm$. Arredondando o valor de t à unidade de milímetro, tem-se que $t = 4mm$ e, consequentemente, $h = 5.7mm$. Dessa forma, o coeficiente de segurança efectivo, no projecto de soldadura, passa a ser:

$$\frac{\sigma_{ced}}{n_s} = 7.4\times10^7 \quad \Rightarrow \quad n_s = 2.8$$

3.3. Estudo Analítico do Vaso

O estudo analítico do vaso, teve por base as condições mecânicas e térmicas envolvidas, bem como as questões geométricas e funcionais pretendidas, mostradas na Tabela 2-3, na secção 2.2. Para tal, foi necessário projectar o reactor de dentro para fora, de forma a optimizar a sua geometria, em termos de volume e de massa, e ao mesmo tempo preencher os requisitos de projecto.

É sabido que a geometria mais resistente a solicitações distribuídas internamente, é a geometria esférica. Contudo, para o projecto do reactor, foi adoptada à partida uma geometria cilíndrica para o mesmo, devido ao facto de ser também uma geometria com um comportamento mecânico relativamente bom neste tipo de situações, mas também devido ao facto de se ter uma geometria que facilite a assemblagem de toda a parafernália de acessórios e interfaces requeridos para o reactor.

Iniciando então o dimensionamento da estrutura principal do reactor, teve-se então em conta o quinto conceito estudado, esquematizado pelas Figs. 2.9, 2.10 e 2.11. Em primeiro lugar, a câmara interna terá que incluir dois eléctrodos: um de referência e um de trabalho, sendo que o de trabalho deverá ter uma área de cerca de 100cm^2 e estar localizado o mais próximo possível da câmara externa. Como tal, é necessário também ter em consideração que o fornecimento do material (*Macor*®) que sustentará a membrana intermédia que separa as duas câmaras, é feito em forma de barras de secção circular, com um diâmetro máximo de 40*mm*, para além do facto de, na câmara interna, ser necessária a presença de um eléctrodo de referência, um eléctrodo de trabalho e de uma entrada/saída de gás. Assim sendo, tendo em conta a geometria das peças que sustentarão a membrana, esta terá um diâmetro de cerca de 34*mm*. A partir daqui, pode-se admitir que o eléctrodo de trabalho da câmara interna tenha um diâmetro externo de cerca de 32*mm*, de onde se retira que, para que o eléctrodo atinja os 100cm^2 de área, é necessário que este tenha um comprimento de

cerca de 100*mm*. Assim, e de forma a dar uma certa margem de manobra, considerou-se que o comprimento útil da membrana intermédia (comprimento em que a membrana estabelece contacto entre as duas câmaras) é de 127*mm*. Deste modo, tendo em conta as dimensões das partes que sustentam a membrana e que fazem a sua assemblagem à tampa superior, o diâmetro e comprimento total da câmara interna são, respectivamente, 40*mm* e 163*mm*.

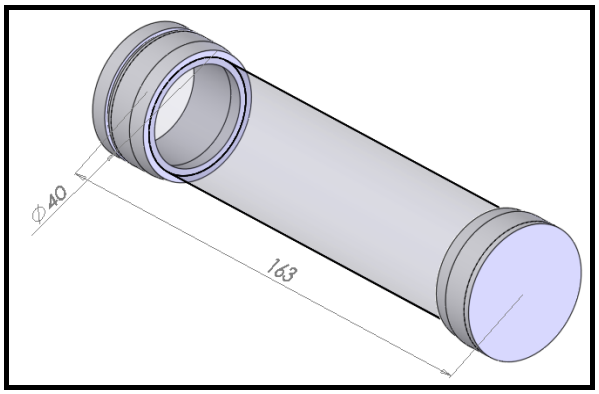


Figura 3.7 – Dimensões da câmara interna.

Tendo as dimensões da câmara interna, é agora altura de determinar as limitações para o dimensionamento da câmara externa do reactor. Dadas as dimensões máximas da câmara interna e tendo em consideração que é necessária a presença de três eléctrodos (um de trabalho, um de referência e um contra-eléctrodo), um manómetro de pressão, uma válvula de segurança, um manómetro de temperatura, um dispositivo para medição de pH e uma entrada/saída de gás, chegou-se às dimensões mínimas que a câmara externa poderia ter, após ter sido efectuada uma possível optimização da disposição de todos estes acessórios, tendo também em conta as dimensões do material disponível para fornecimento (no que diz respeito às camadas de material exteriores à câmara externa: vidro, sistema de aquecimento, refractário e tubo de metal que constitui a parte lateral da estrutura externa. O compromisso entre todas estas variáveis, determinou que o diâmetro e comprimento da câmara externa (diâmetro interno e comprimento interno do copo de vidro), seriam 106*mm* e 173*mm*, respectivamente.

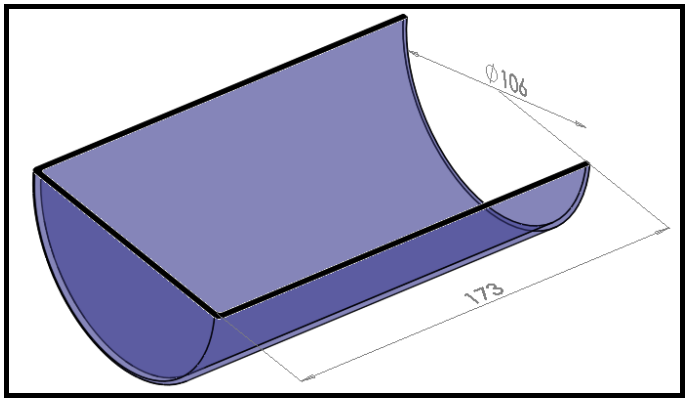


Figura 3.8 – Vista em corte das dimensões internas do copo de vidro que envolve a câmara externa.

A espessura do copo de vidro (2*mm*), do sistema de aquecimento (~3*mm*) e do refractário adoptado (2*mm*), adicionado a um pequeno espaçamento entre estes três componentes, de forma garantir o equilíbrio de pressão em todos eles (1*mm*), resulta no facto que o diâmetro interno e comprimento mínimos da parede lateral do reactor terão que ser de 125*mm* e 187*mm*.

Aço Inoxidável 316L – Propriedades		
Propriedade		**Valor**
Tensão de Rotura [*MPa*]		485
Tensão de Cedência [*MPa*]		205
Densidade [kg/m^3]		8000
Coeficiente de Poisson		0.25
Módulo de Elasticidade [*GPa*]		193
Coeficiente Médio de Expansão Térmica [*μm/m/ºC*]	0 – 100 *ºC*	15.9
	0 – 315 *ºC*	16.2
	0 – 538 *ºC*	17.5
Conductividade Térmica [*W/m.ºK*]	a 100 *ºC*	16.3
	a 500 *ºC*	21.5
Calor Específico (0 – 100 *ºC*) [*J/kg.ºK*]		500

Tabela 3-3 – Propriedades do Aço Inoxidável 316L.

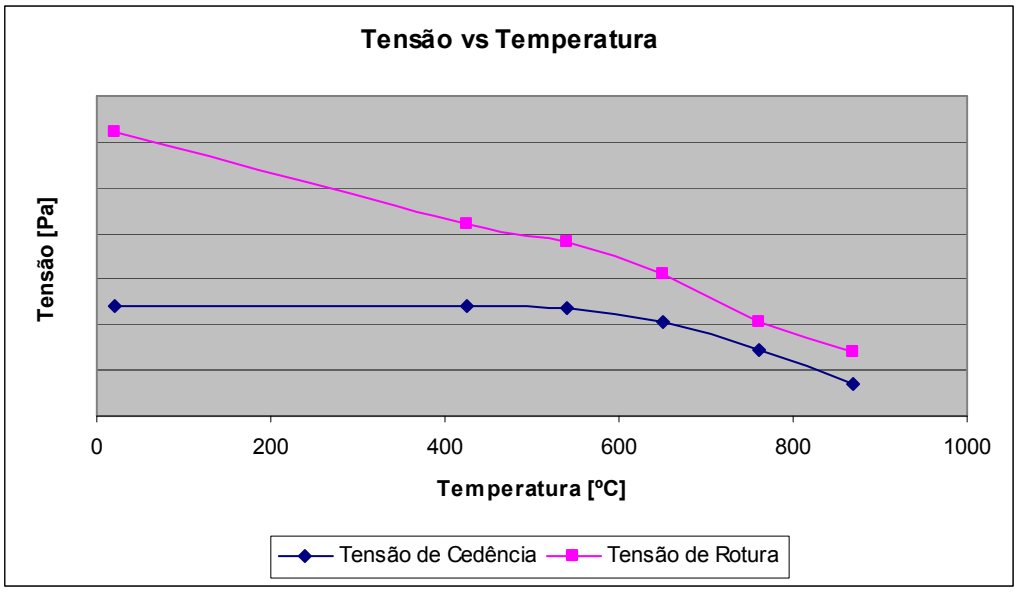


Figura 3.9 – Evolução das tensões de cedência e de rotura do aço 316L, com a temperatura.

A partir das dimensões obtidas para a parede lateral, e sabendo as condições a que esta está sujeita, é agora altura de dimensionar toda a estrutura externa do reactor. Como foi visto anteriormente (secção 2.4), o material que constitui a estrutura externa é o aço inoxidável 316L, cujas propriedades (obtidas através do fabricante e da bibliografia [44] e [45]) estão descritas na Tabela 3-3.

Visto não existir bibliografia com as propriedades do material, à temperatura que se pretende estudar o mesmo (ou seja, a 200°*C*), foi necessário efectuar um gráfico de evolução das tensões de cedência e de rotura do material, segundo os valores fornecidos pela bibliografia [44] e [45], das propriedades do material, a determinadas temperaturas. Essa evolução pode ser verificada na Fig. 3.9, de forma qualitativa. Do gráfico apresentado, observa-se que a tensão de cedência do material não varia com o

aumento de temperatura, até esta atingir cerca de 470º*C*. A partir daqui, a tensão de cedência sofre uma diminuição aproximadamente quadrática até cerca dos 700º*C*, onde então a diminuição toma uma característica aproximadamente linear. Relativamente à tensão de rotura, esta sofre um decréscimo aproximadamente linear, desde a temperatura ambiente até cerca de 470º*C*, a partir da qual passa a ter um decréscimo com uma característica aproximadamente cúbica.

Assim sendo, a tensão de cedência do material tida em conta, para a análise do vaso de pressão, segundo a condição número 1 da Tabela 2-3, é igual à tensão de cedência do material à temperatura ambiente (205*MPa*).

O coeficiente de segurança utilizado no dimensionamento do vaso seguiu o critério determinado na secção 2.1 e utilizado nos projectos de ligações aparafusadas e de ligações soldadas, ou seja, $n_s = 2.55$ e, desta forma, a tensão admissível a adoptar será dada pela Eq. (3.32):

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ced}}{n_s} = \frac{205 \times 10^6}{2.55} = 80.4MPa \tag{3.32}$$

3.3.1. Projecto do Cilindro

Nesta secção, será apresentada a solução analítica no projecto do cilindro que constitui a parte lateral do reactor. Para tal, tiveram-se em conta as seguintes condições:

- Pressão interna: $p = 10MPa$
- Temperatura interna: $T = 200^{\circ} C$
- Diâmetro interno: $D_i = 0.125m$
- Tensão admissível: $\sigma_{adm} = 80.4MPa$
- Material linear, homogéneo e isotrópico

Para além disso, foi necessário admitir que este problema trata um cilindro de topos fechados e direitos, sujeito a pressão interna uniformemente distribuída. Assim, recorrendo às Eqs. (1.28), (1.30) e (1.31), tem-se que a tensão equivalente de *Von Mises* (critério utilizado na determinação da tensão equivalente) é, neste caso, dada por:

$$\sigma_{eq_{VM}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}{2}} =$$
$$= \sqrt{\frac{\left(p\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} - p\frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\right)^2 + \left(p\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + p\right)^2 + \left(p\frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + p\right)^2}{2}} \tag{3.33}$$

Onde $r_i = D_i/2$, $r_o = D_o/2$ e $\sigma_{eq_{VM}} \leq \sigma_{adm} = 80.4MPa$. Desta forma, tendo em conta as condições acima descriminadas, obtém-se após algumas simplificações, o valor do diâmetro (ou, neste caso, do raio) externo do cilindro, de modo a que este não ultrapasse o valor da tensão admissível,

$$r_o \geq 70.6mm \quad \Rightarrow \quad D_o \geq 0.1412m$$

donde se retira que a espessura do cilindro é igual a $t = r_o - r_i = 8.1mm$.

Este seria o resultado óptimo, segundo o método analítico. Contudo, existem alguns assuntos construtivos a ter em conta antes de dar este dimensionamento como aquele a adoptar. O primeiro aspecto, prende-se com o facto da dimensão da soldadura a efectuar entre a aba do cilindro e o próprio cilindro. Tal como foi visto na secção 3.2.2, é necessária uma determinada dimensão para efectuar o chanfro necessário à soldadura, que neste caso irá retirar cerca de 4*mm* à espessura do cilindro, como se pode ver pelo esquema mostrado na Fig. 3.10. Para além disso, é também necessário ter em consideração a necessidade de incluir um vedante que garanta a estanquecidade do vaso de pressão, vedante este que, segundo a bibliografia [46], terá um diâmetro interno de 133*mm* e um diâmetro de 2.38*mm*. Isto implica que a calha onde o vedante será acomodado tenha, no mínimo, tenha uma abertura que irá também retirar cerca de 3*mm* à espessura do cilindro, no topo deste, como mostra a Fig. 3.11.

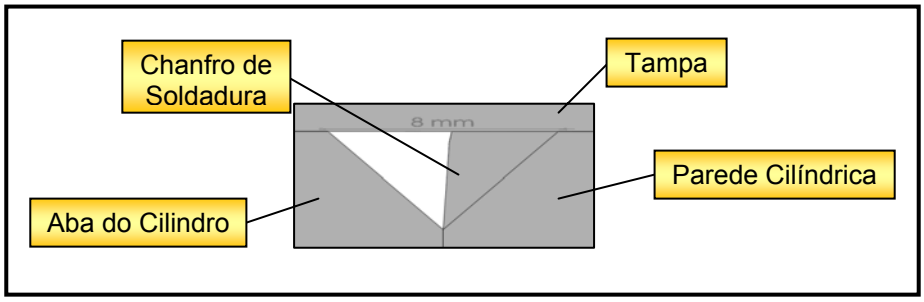


Figura 3.10 – Dimensão necessária para o chanfro de soldadura entre o cilindro e a aba.

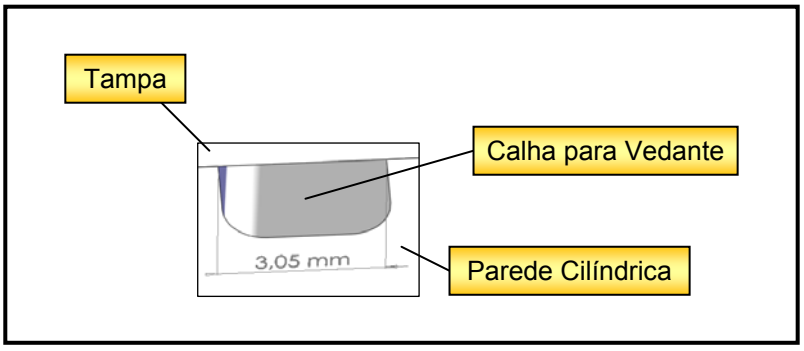


Figura 3.11 – Dimensão necessária para a calha que acomoda o vedante.

Assim, sendo o diâmetro interno do vedante de 132*mm*, a largura da calha de 3*mm*, a largura do chanfro de soldadura no lado do cilindro de *4*mm e o diâmetro máximo de tubo que o fornecedor oferece de 150*mm*, restam cerca de 2*mm* de espaçamento entre o chanfro de soldadura e a calha do vedante, o que se pode considerar aceitável, mas que obriga a utilizar as dimensões de diâmetro interno mínimo e diâmetro externo máximo de tubo que o fornecedor consegue disponibilizar. Desta forma, será necessário então construir o cilindro com as dimensões desse mesmo tubo, retirando apenas uma porção muito pequena aos seus diâmetros interno e externo, para efeitos de acabamento. Tem-se então que, as dimensões do cilindro, que constitui a parede lateral do vaso de

pressão, serão aproximadamente $D_i = 0.125m$ e $D_o = 0.150m$. Consequentemente, as tensões envolvidas no cilindro, sujeito às mesmas condições, segundo as Eqs. (1.28), (1.30) e (1.31), são respectivamente:

$$(\sigma_\theta)_{\max} = p\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = 55.45MPa$$

$$\sigma_z = \frac{pr_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = 22.73MPa$$

$$(\sigma_r)_{\max} = -p = -10MPa$$

de onde se retira que a tensão equivalente de *Von Mises* neste caso é igual a:

$$\sigma_{eq_{VM}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}{2}} = 56.68MPa$$

o que implica que o factor de segurança real utilizado é de $n_s = \sigma_{ced} / \sigma_{eq_{VM}} = 3.62$. O círculo de *Mohr* referente ao estado de tensão do cilindro, é mostrado na Fig. 3.12:

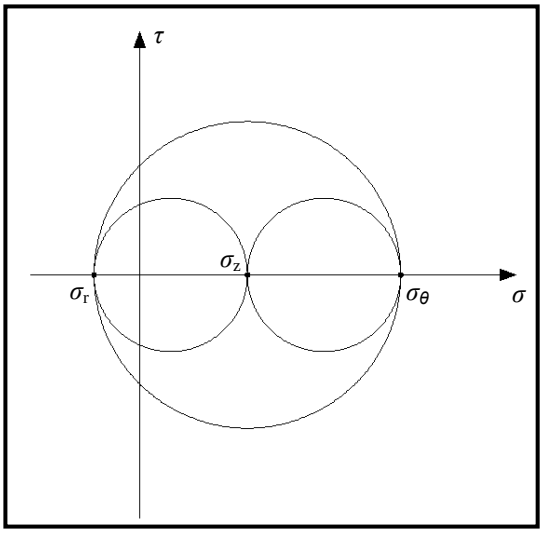


Figura 3.12 – Círculo de *Mohr* referente ao estado de tensão do cilindro.

No que diz respeito às tensões tangenciais referentes às tensões térmicas, como é possível verificar, os seus resultados são irrisórios, comparando com os resultados referentes à pressão aplicada no cilindro. Foi necessário recorrer à bibliografia [6], de forma obter a estimativa da diferença de temperaturas ΔT entre as superfícies interna e externa do cilindro. Daí obtém-se então, para uma temperatura interna de 200°*C*:

Superfície externa (tracção): $$\sigma_t = \frac{\Delta T \gamma E}{2(1-\nu)\ln(r_o/r_i)}\left(1 - \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\ln\frac{r_o}{r_i}\right) = 1.40MPa$$

Superfície interna (compressão): $$\sigma_t = \frac{\Delta T \gamma E}{2(1-\nu)\ln(r_o/r_i)}\left(1 - \frac{2r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}\ln\frac{r_o}{r_i}\right) = -1.59MPa$$

Da mesma forma, para a situação em que não existe pressão interna e em que se tem uma temperatura interna de 700º*C* (condição 2, da Tabela 2-3), as tensões térmicas no cilindro são:

Superfície externa (tracção): $$\sigma_t = \frac{\Delta T \gamma E}{2(1-\nu)\ln(r_o/r_i)}\left(1-\frac{2r_i^2}{r_o^2-r_i^2}\ln\frac{r_o}{r_i}\right) = 4.32MPa$$

Superfície interna (compressão): $$\sigma_t = \frac{\Delta T \gamma E}{2(1-\nu)\ln(r_o/r_i)}\left(1-\frac{2r_o^2}{r_o^2-r_i^2}\ln\frac{r_o}{r_i}\right) = -4.88MPa$$

que, como é possível observar, estão muito abaixo da tensão de cedência característica do material a 700º*C* e também muito abaixo da tensão admissível para este projecto.

3.3.2. Projecto das Tampas

Nesta secção, será apresentada a solução analítica no projecto das tampas que constituem os topos do reactor. Para tal, tiveram-se em conta as mesmas condições consideradas no projecto do cilindro.
É de notar que foi adoptado este conceito de dois topos aparafusados, em detrimento do quarto conceito apresentado na secção 2.3 deste trabalho, devido ao facto que, no caso do quarto conceito, as concentrações de tensões existentes entre a parede lateral (cilindro) e o topo inferior levariam à inclusão de um raio de concordância entre as duas partes. Esse seria tal, que iria reduzir substancialmente o volume interno do reactor, obrigando assim a aumentar o tamanho do mesmo e/ou a dispor os elementos internos de forma diferente, ou mesmo complicar a sua geometria. Assim, foi adoptada a situação em que se têm duas tampas aparafusadas ao cilindro, de forma a eliminar essas concentrações de tensões.
Para além disso, foi necessário admitir que, neste problema, tratam-se de duas placas planas, espessas, sujeitas a uma carga uniformemente distribuída numa das suas superfícies planas, simplesmente apoiadas (num caso destes, uma placa simplesmente apoiada é um caso mais desfavorável do que uma placa encastrada [4], portanto, está do lado da segurança), com condições de fronteira circulares. Considerou-se ainda que, apesar das tampas estarem aparafusadas a uma distância superior, a influência da carga nas tampas seria desde $r = 0mm$ até $r_{ved} = 69mm$, ou seja, até ao raio externo da calha no cilindro, que acomoda o vedante localizado entre o cilindro e a tampa. Assim, substituindo a Eq. (1.32) (momento máximo no centro da placa) na Eq. (1.33) (tensão máxima na placa), tem-se:

$$\sigma_{\max} = \frac{6pr_{ved}^2(3+\nu)}{16t^2} \tag{3.34}$$

onde *t* é a espessura da tampa e, tal como no caso do cilindro, $\sigma_{\max} \le \sigma_{adm} = 80.4MPa$. Desta forma, tendo em consideração as condições do problema e as características do material (Tabela 3-3), obtém-se o valor necessário da espessura da placa, de modo a que este não ultrapasse o valor da tensão admissível,

$$t \ge 26.9mm$$

No que diz respeito às tensões térmicas, como é possível verificar, os seus resultados são irrisórios, comparando com a tensão admissível deste projecto. Foi necessário recorrer à bibliografia [6], de

forma obter a estimativa da diferença de temperaturas ΔT entre as superfícies interna e externa das tampas. Daí obtém-se então, para uma temperatura interna de 200º*C*:

$$\sigma = \frac{1}{2}\frac{\Delta T \gamma E}{(1-\nu)} = 3.85 MPa$$ (compressão na face quente e tracção na face fria)

Da mesma forma, para a situação em que não existe pressão interna e em que se tem uma temperatura interna de 700º*C* (condição 2, da Tabela 2-3), as tensões térmicas nas tampas são:

$$\sigma = \frac{1}{2}\frac{\Delta T \gamma E}{(1-\nu)} = 9.01 MPa$$ (compressão na face quente e tracção na face fria)

que, como é possível observar, estão muito abaixo da tensão de cedência característica do material a 700º*C* e também abaixo da tensão admissível para este projecto.

É ainda de notar que, a tampa que sustenta todos os acessórios e interfaces, sofre uma redução de material, devido aos furos que são abertos para que sejam assemblados os acessórios na tampa. E, segundo a bibliografia [6], o volume retirado ao material, deve ser acrescentado em espessura. Assim, foi necessário acrescentar cerca de 2*mm* à espessura da placa que sustenta todos os acessórios, em todo o perímetro que circunda esses mesmos acessórios, tendo ficado com 28.9*mm* de espessura nessa zona.

3.4. Conclusões Gerais do Estudo Analítico

Face aos resultados obtidos com a aplicação do método analítico, pode-se concluir à partida que, as tensões a que o material está sujeito devido às cargas térmicas são bastantes menores do que a tensão admissível deste projecto (entre, cerca de 10 a 50 vezes menor), o que, analiticamente, leva à conclusão que a sua influência no comportamento do material que constitui a estrutura principal do reactor, será bastante reduzida.

Relativamente às tensões produzidas pela presença de pressão interna, estas permitiram dimensionar as três peças que constituem a estrutura externa do reactor, tendo como limite a tensão admissível considerada. Contudo, como foi possível observar, nem sempre a teoria constitui uma fonte suficiente para o projecto, ou seja, a influência da possibilidade e disponibilidade relativa ao fornecimento do material e mesmo da inclusão de acessórios imprescindíveis ao funcionamento do reactor, foi suficientemente grande para obrigar a modificar o resultado analítico. No caso do projecto do cilindro, foi necessário alterar a espessura calculada devido à inclusão, quer do vedante, quer do chanfro de soldadura. No caso do projecto das tampas, uma destas sofreu um aumento de espessura, consequência da inclusão de furos destinados à assemblagem de acessórios nessa mesma placa.

É de notar que, a dificuldade da elaboração de toda a parte de projecto relacionada com o método analítico foi, ao longo do tempo, obrigando a sucessivas alterações, à medida que surgiam problemas construtivos, dificuldades ao nível do fornecimento de material, impossibilidades físicas, exigências a nível funcional, problemas a nível económico do projecto, etc., chegando-se por fim a uma solução viável e que preenchesse todos os requisitos de projecto.

4. ANÁLISE DE COMPORTAMENTO: MÉTODO COMPUTACIONAL

4.1. Introdução

Este capítulo inicia-se com a descrição do método computacional utilizado no estudo do vaso, onde é explorado o seu fundamento e feita a análise do vaso propriamente dito. Esta análise, é feita com base no dimensionamento previamente efectuado no capítulo 3 deste trabalho, ou seja, tendo em consideração todas as condições impostas e o dimensionamento calculado através do Método Analítico, a análise pelo Método Computacional tem por base esses mesmos resultados. A partir daí, mais à frente na presente dissertação, nomeadamente no capítulo 6, os resultados obtidos neste capítulo serão confrontados com os resultados obtidos através do Método Analítico, ou seja, serão comparados os estados de tensão em determinados pontos da estrutura externa do reactor, com os resultados do capítulo anterior, verificando a semelhança ou disparidade entre os resultados dos métodos utilizados e, possivelmente, a consistência de cada um dos métodos.

4.2. Método Computacional

O método computacional utilizado no estudo do vaso sujeito a alta pressão e alta temperatura, teve como base teórica aquela que está descrita na secção 1.3.1.3 desta dissertação, ou seja, o MEF, sendo que foi utilizado o programa comercial de análise de elementos finitos *ANSYS* versão 10.0.
Esta análise teve também como fundamento o dimensionamento e geometria obtidas pelo método analítico, tendo sido estudado o comportamento da estrutura externa do reactor, tendo em conta as características do material utilizado, descritas na Tabela 3-3, bem como o comportamento da tensão de cedência relativamente à presença de alta de temperatura esquematizado pela Fig. 3.9.
Na análise computacional, foi assumido que a temperatura aplicada no interior do reactor é conduzida uniformemente para todas as superfícies interiores da estrutura externa. Isto porque, pela variação da tensão de cedência do material, esquematizada na Fig. 3.9, o comportamento do material a 200º*C* apenas sofre alterações a nível da tensão de rotura, o que implica uma menor gama de tensões onde exista encruamento do material. No entanto, visto que todo o projecto está a ser feito visando estados de tensão ao nível da tensão de cedência, com coeficientes de segurança generosos aplicados, esse factor terá uma relevância muito baixa no decorrer da análise. Visto isto, adicionado ao facto das tensões térmicas resultantes da análise pelo método analítico terem valores irrelevantes quando comparados com a tensão admissível do material, a análise computacional cingiu-se a uma análise

de comportamento estrutural do material que constitui a estrutura externa, de uma geometria igual àquela que foi projectada no capítulo anterior.

Nesta análise, a modelação do problema, dada a axissimetria do reactor, foi feita através do perfil do vaso de pressão, centrado no seu eixo de axissimetria. Para tal, foram utilizados elementos sólidos estruturais, sendo que estes são os únicos elementos bidimensionais que permitem fazer este tipo de modelação. Dentro da gama de elementos disponíveis e dada a geometria do perfil do próprio reactor, foram utilizados elementos quadrangulares de oito nós, designados por *Plane82*. Estes elementos são uma versão de maior ordem dos elementos quadráticos bidimensionais de quatro nós, oferecendo resultados mais precisos que estes em casos de malhas automáticas mistas (quadráticas-triangulares) e suportam geometrias irregulares sem muita perda de precisão ao nível dos resultados. Os elementos de oito nós têm geometrias de deslocamento compatíveis e são bastante apropriados para modelar fronteiras curvas. Estes são definidos por oito nós, em que cada um deles tem dois graus de liberdade: deslocamentos nas direcções nodais *x* e *y*, podendo ser utilizado como um elemento plano ou como um elemento axissimétrico. A sua geometria é traduzida pela Fig. 4.1.

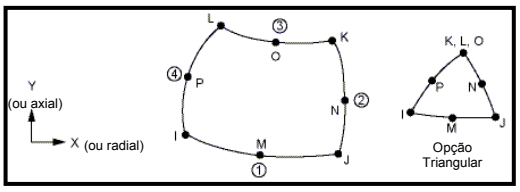


Figura 4.1 – Esquematização do elemento *Plane82*.

Este tipo de elemento, tem como considerações e restrições os seguintes pontos:

- A área do elemento tem que ser positiva.
- O elemento tem que pertencer a um plano global X-Y, como mostrado na Fig. 4.1, e o eixo Y é o eixo de simetria, para o caso de análises axissimétricas. Uma estrutura axissimétrica deverá ser modelada nos quadrantes onde os valores de X são positivos.
- No caso em que numa face do elemento tenha sido retirado o nó intermédio, implica que o seu deslocamento varie de forma linear, impossibilitando assim a existência de um deslocamento parabólico.

Na secção 4.3, será então apresentada a modelação, a malha, as cargas, considerações e resultados do estudo da estrutura.

4.3. Estudo Computacional do Vaso

Durante este estudo foram feitas inúmeras modelações e análises computacionais do problema em causa, de modo a chegar à modelação que melhor se aproximasse da realidade, mas também, que garantisse a formação de uma malha o mais uniforme possível e uma boa precisão relativamente aos resultados finais. A modelação final adoptada teve em conta várias considerações, nomeadamente:

- O vaso de pressão é axissimétrico, não sendo por isso considerados os furos relativos à assemblagem dos interfaces na tampa superior e, consequentemente, tendo esta uma espessura constante e igual à tampa inferior.
- O material considerado é linear, uniforme e isotrópico, tendo em conta as propriedades mostradas na Tabela 3-3.
- Foram utilizados elementos sólidos, estruturais, bidimensionais, quadrangulares de 8 nós.
- Foi considerada uma zona que pretende simular a presença de parafusos, na assemblagem das tampas à zona lateral do reactor. Para tal, foi assumido que, na zona em que os parafusos estão colocados, o deslocamento das tampas nessa zona está constrangido ao deslocamento da parte cilíndrica na mesma zona, considerando-se portanto que os parafusos são unidades rígidas. É certo que tal não corresponde à realidade (primeiro porque os parafusos não são rígidos e, segundo, porque os parafusos, apesar da sua disposição segundo um eixo de simetria, não são uma união de geometria circular contínua), mas desta forma obteve-se uma melhor aproximação da análise à realidade, do que se tivesse sido apenas considerado que as tampas estivessem coladas à aba da parte lateral.
- A aplicação da pressão interna, teve em conta a possibilidade desta poder ter influência sobre o material, até à zona onde estão colocados os vedantes entre as tampas e a parte lateral.
- Os cordões de soldadura fazem parte integrante do material, isto é, para possibilitar a construção de uma malha mais regular, foi considerado que os cordões de soldadura, as abas e o cilindro que constituem a zona lateral, são uma só peça.
- Foi desprezada a pressão ambiente, que seria aplicada em toda a zona exterior do reactor.
- O reactor está apoiado na zona inferior da tampa inferior, simulando assim o apoio do reactor sobre uma bancada ou uma superfície horizontal e plana.
- As dimensões do perfil modelado, seguem as dimensões calculadas pelo método analítico.

A análise computacional feita à estrutura, teve por base as condições que incluem uma pressão interna de 10*MPa* e uma temperatura interna de 200º*C*. Desta forma, o valor da tensão admissível vem também da Eq. (3.32): $\sigma_{adm} = 80.4MPa$.

A modelação da estrutura externa do reactor e a malha adoptada, são mostradas nas Figs. 4.2 e 4.3:

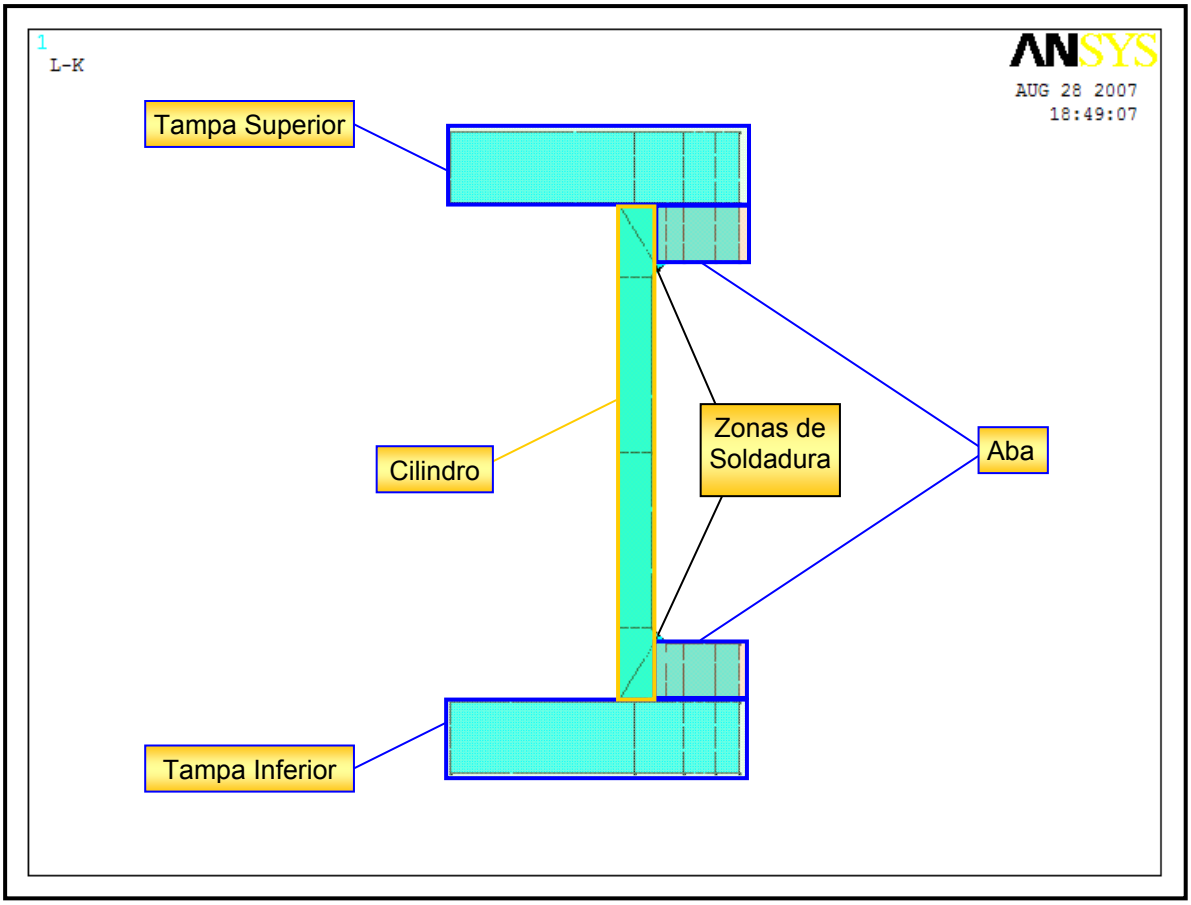


Figura 4.2 – Modelação do perfil do vaso de pressão.

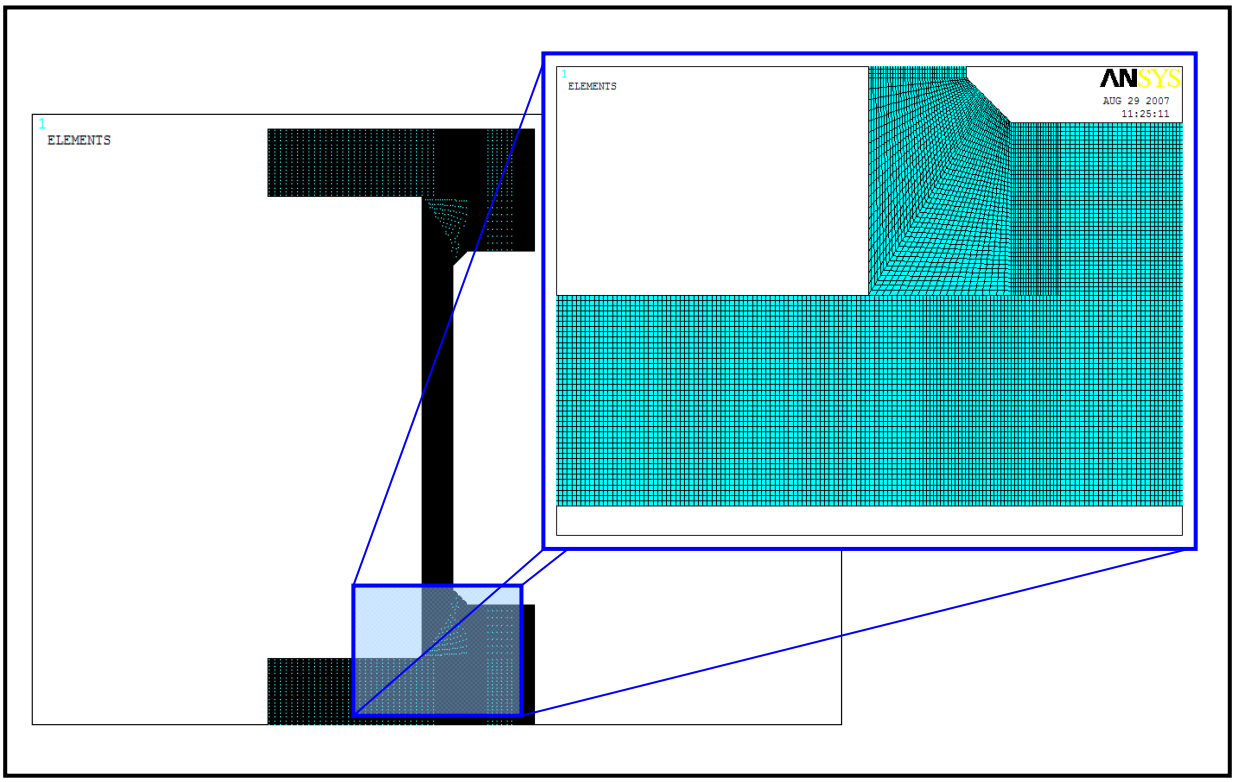


Figura 4.3 – Malha final adoptada para a análise computacional do reactor.

Após a modelação, é então altura de aplicar todas as cargas (pressão e temperatura internas) e constrangimentos (reactor apoiado na face inferior da tampa inferior e ligação rígida auferida pelos parafusos que unem as tampas às abas da zona lateral), seguidamente correr a solução final e, por fim, analisar os resultados.

O estado de tensão do reactor sujeito à condições já acima mencionadas, é traduzido pelas Figs. 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. A primeira, mostra a vista geral do estado de tensões a que o perfil modelado está sujeito. Como é possível observar, existem duas zonas críticas na modelação adoptada, em termos de tensões: uma, na zona modelada como sendo a zona da soldadura; outra, na zona modelada como aproximação da ligação aparafusada.

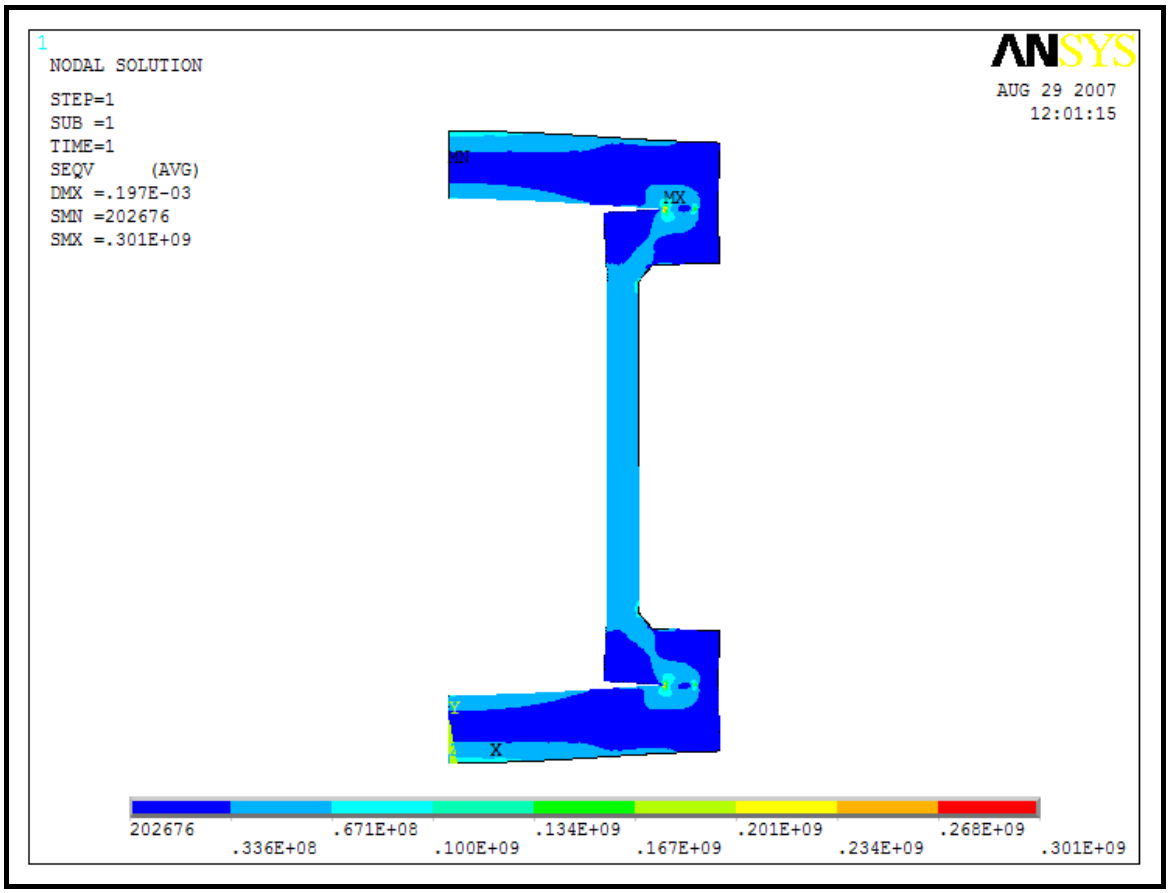


Figura 4.4 – Estado de tensões (tensão equivalente de *Von Mises*) do perfil do reactor.

É de notar que, foi efectuado um refinamento da malha, tendo em conta a convergência dos valores de tensão em determinados pontos da estrutura, por forma a garantir uma maior precisão dos resultados obtidos. As zonas de concentrações de tensões verificadas prendem-se com o facto de estarem localizadas na vizinhança de pontos de descontinuidade que, na realidade, não irão existir. Ou seja, no caso da zona do cordão de soldadura, este nunca será perfeitamente triangular, tendo por norma a tendência a formar um determinado raio de curvatura, quando a soldadura é executada, o que alivia um pouco as tensões naquele ponto específico. E no caso da zona que simula a presença de uma ligação aparafusada entre as tampas e as abas laterais, a descontinuidade verificada é também algo que não acontece na realidade, isto é, nem os parafusos ligam as duas partes de forma rígida (visto eles próprios estarem também sujeitos a um determinado estado de

tensão e tendo uma determinada ductilidade própria), nem o material da tampa e da aba está fundido entre si naquela zona, levando portanto a crer que, comparando com a realidade, não faz sentido existir uma descontinuidade de material e, consequentemente, não existe razão para aquela ser uma zona de concentração de tensões. Logo, pode-se perfeitamente assumir que ambas as concentrações verificadas nas Figs. 4.4 e 4.5, são desprezáveis e que não serão tomadas em conta na análise comparativa entre os vários métodos, nem no dimensionamento do próprio reactor.

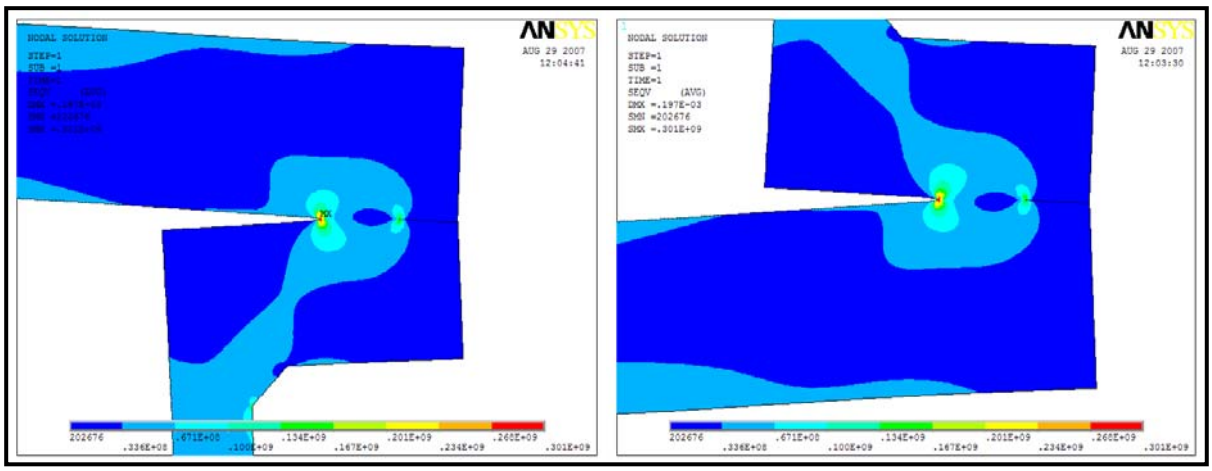


Figura 4.5 – Pormenor dos pontos onde se verificou concentração de tensões.

Observando a Fig. 4.5, verifica-se que realmente o estado de tensão, na zona onde as partes que constituem a estrutura externa unem, é máximo e muito localizado, visto existir uma descontinuidade de material nesta modelação e, consequentemente, uma concentração de tensões nesta zona. No caso da zona modelada para simular a presença do cordão de soldadura, a concentração de tensões não é tão evidente, devido ao facto da descontinuidade de material nessa zona ser muito menos evidente do que na anterior e existe devido à ausência de um raio de concordância nesta zona da modelação.

No que diz respeito às zonas que foram analisadas mais pormenorizadamente e que vão constituir termo de comparação entre os vários métodos utilizados na análise deste vaso de pressão, bem como, terão grande importância no projecto do mesmo, o seu estado de tensão pode ser observado com mais detalhe nas Figs. 4.6 e 4.8.

A Fig. 4.6 diz respeito à zona cilíndrica da parte lateral do reactor, onde se verifica uma certa homogeneidade ao nível da tensão equivalente de *Von Mises* na maior parte do seu perfil, excepto na já referida zona que inclui a união à aba lateral e o cordão de soldadura. Contudo, para poder ser feita uma comparação coerente com os resultados analíticos, foi considerada a zona *à priori* com um estado de tensões mais homogéneo e sujeito à menor influência possível dos estados de tensão presentes nos extremos do cilindro. Assim, sendo as tensões consideradas, foram as tensões equivalentes da secção transversal localizada exactamente a meio do cilindro. Desta forma, os resultados obtidos através da simulação computacional, nos pontos nas faces interior e exterior do cilindro, da referida secção transversal, estão listados na Tabela 4-1.

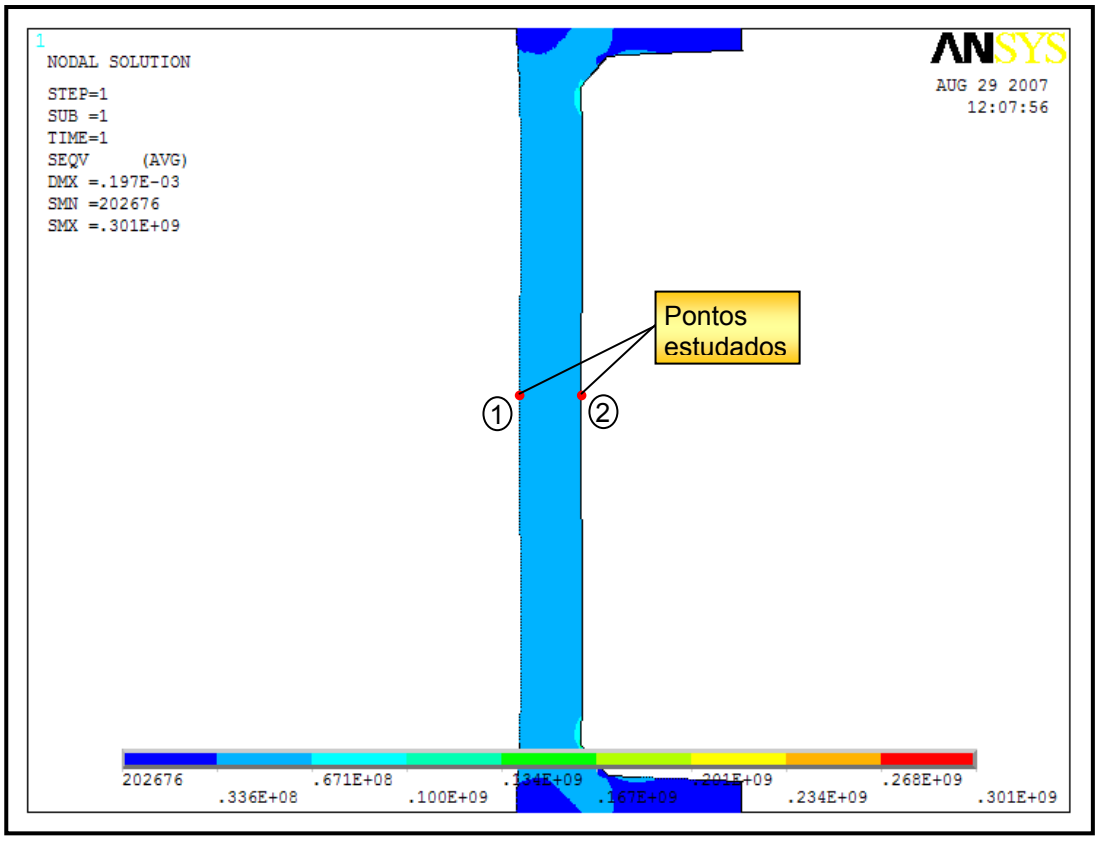


Figura 4.6 – Detalhe da tensão equivalente no cilindro.

Ponto	Tensões Principais			Tensão Eq. de *Von Mises* [*MPa*]
	σ_1 [*MPa*]	σ_2 [*MPa*]	σ_3 [*MPa*]	
1	58.35	33.49	-10.00	59.92
2	45.27	22.33	0	39.21

Tabela 4-1 – Valores das Tensões nos Pontos Estudados na Parte Lateral.

Segundo os resultados listados na Tabela 4-1, a tensão equivalente máxima situa-se na face interna do cilindro, sendo que cada uma das tensões principais nesse ponto correspondem às seguintes componentes: $\sigma_1 = \sigma_\theta$ (tensão tangencial); $\sigma_2 = \sigma_z$ (tensão axial); $\sigma_3 = \sigma_r = -p$ (tensão radial). Na Fig. 4.7 está representado o círculo de *Mohr* que traduz o estado de tensão do cilindro que constitui a zona lateral do reactor, no ponto 1. Como é possível verificar pela Fig. 4.7 ou pela Tabela 4-1, os resultados das tensões mínima e máxima no ponto 1, são idênticos aos obtidos pelo método analítico, embora a tensão axial seja consideravelmente superior, no presente método.

A Fig. 4.8 diz respeito à zona central das tampas do reactor, onde se verifica que, tal como esperado, na fibra correspondente a $h = t/2$ (onde *t* é a espessura da tampa), a tensão equivalente de *Von Mises* é mínima, notando-se um aumento da tensão equivalente, à medida que se aproxima da face das tampas, verificando-se que a tensão equivalente máxima se localiza ao centro da face externa de cada uma das tampas.

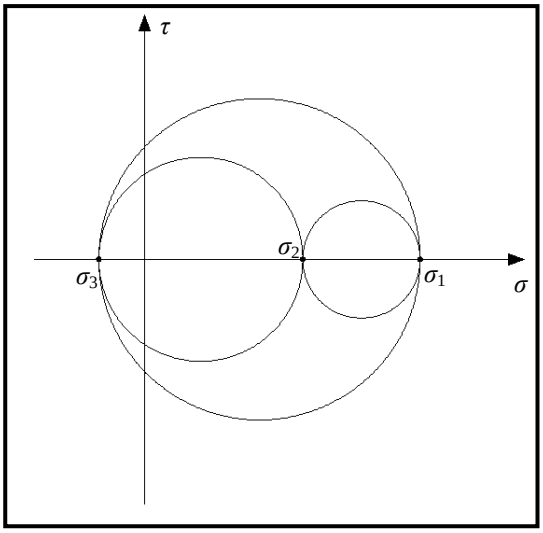


Figura 4.7 – Círculo de *Mohr* referente ao estado de tensão do ponto 1, do cilindro.

Outro resultado, também esperado nesta análise às tampas do reactor, é o facto de, o ponto de tensão equivalente máxima nas tampas, localizado ao centro destas na face exterior de cada uma dela, estar sujeito a um estado plano de tensão, como se pode verificar pelos resultados listados na Tabela 4-2, nos pontos 3 e 6 representados na Fig. 4.8.

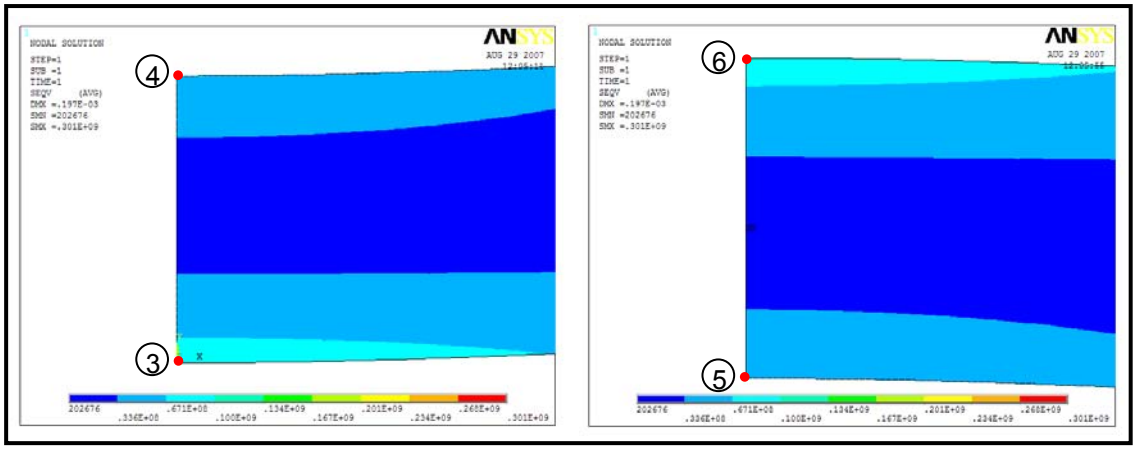


Figura 4.8 – Detalhe da tensão equivalente no centro das tampas (inferior e superior, respectivamente, visto da esquerda para a direita).

Ponto	Tensões Principais			Tensão Eq. de *Von Mises* [*MPa*]
	σ_1 [*MPa*]	σ_2 [*MPa*]	σ_3 [*MPa*]	
3	81.48	81.48	0	81.48
4	-10.0	-77.25	-77.25	67.25
5	-10.0	-77.25	-77.25	67.25
6	81.48	81.48	0	81.48

Tabela 4-2 – Valores das Tensões nos Pontos Estudados, nas Tampas.

Analisando os valores listados na Tabela 4-2, verifica-se à partida que o estado de tensão de pontos idênticos entre as duas tampas, são exactamente iguais (estado de tensão do ponto 3 é igual ao estado de tensão do ponto 6; estado de tensão do ponto 4 é igual ao estado de tensão do ponto 5). Os pontos 4 e 5 só não estão também sujeitos a um estado de tensão plana, devido ao facto de

pertencerem à superfície onde a pressão interna do reactor actua ($\sigma_1 = -p = -10MPa$). Como é óbvio, o estado de tensão plana, verificado nos pontos 3 e 6, deve-se à axissimetria do problema. No que diz respeito a tensões equivalentes, nos pontos de tensão máxima, esta é muito semelhante à tensão admissível de projecto considerada ($\sigma_{adm} = 80.4MPa$), embora seja ligeiramente superior, cerca de 1.33% acima da tensão admissível.

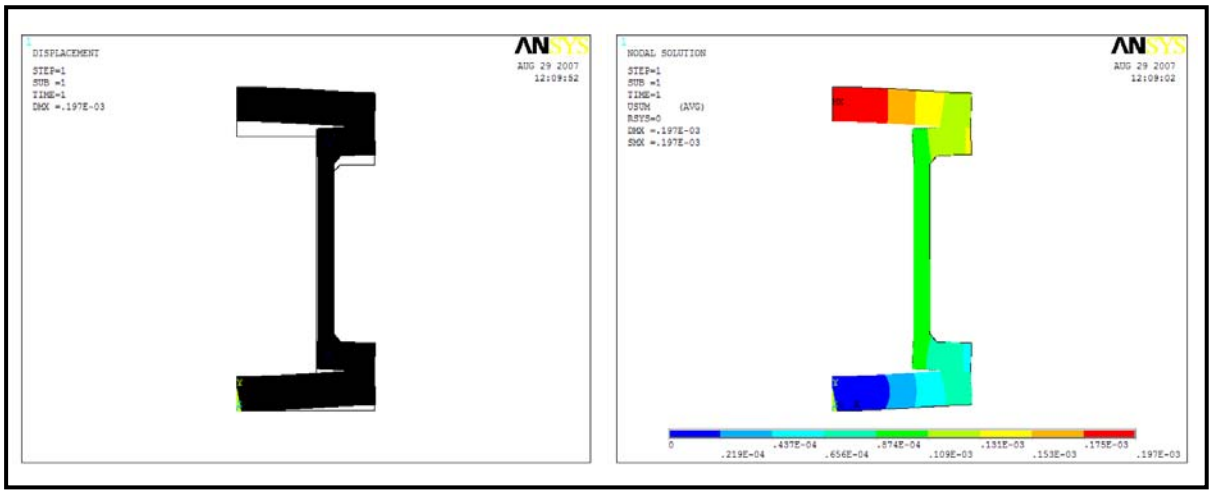


Figura 4.9 – Deformada e valores das deformações da estrutura do vaso.

A Fig. 4.9 mostra o aspecto geral da deformada da estrutura, quando esta está sujeita às condições de trabalho utilizadas no estudo, bem como, o valor das deformações que a estrutura sofre nessa situação. Como se pode observar, a deformação máxima da estrutura, relativamente à sua configuração inicial, ocorre na tampa superior, tendo o valor de 0.197*mm*. Contudo, é de notar que, ambas as tampas sofrem uma deformação geometricamente idêntica, o que leva a crer que ambas terão valores reais de deformação idênticos. A zona lateral do reactor sofre deformações muito pequenas, na direcção radial, relativamente à deformação máxima equivalente (cerca de dez vezes inferior) ou relativamente à deformação no sentido axial, como se pode constatar através da Fig. 4.10, que compara os deslocamentos radial e axial da estrutura.

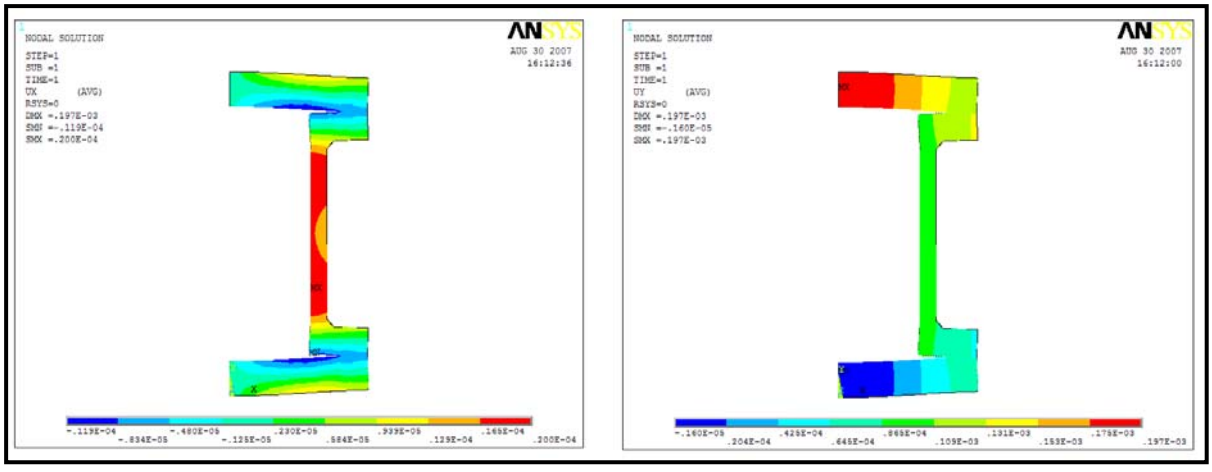


Figura 4.10 – Comparação entre as deformações radial e axial.

4.4. Conclusões Gerais do Estudo Computacional

Face aos resultados obtidos com a análise pelo método computacional, pode-se concluir à partida que, na tentativa de modelar a estrutura à semelhança da realidade, criaram-se certas zonas de concentração de tensões (nomeadamente, nas zonas modeladas para simular a presença de parafusos e a presença do cordão de soldadura), que acabaram por ser descartadas, devido ao facto dessas modelações não corresponderem à realidade, no que diz respeito tanto à rigidez dos parafusos como à geometria do próprio cordão de soldadura. No entanto, a modelação utilizada permitiu uma aplicação mais real dos esforços em causa e obter resultados mais precisos nas zonas estudadas, sendo que foram desprezados os resultados nos pontos onde existe concentração de tensões, bem como na sua vizinhança.

No que diz respeito aos resultados em si, nos pontos estudados, tanto no caso do cilindro, como no caso das tampas, os valores máximos das tensões equivalentes, são bastante semelhantes àqueles calculados pelo método analítico, embora os resultados verificados no caso das tampas, ultrapasse ligeiramente o valor da tensão equivalente admissível, considerada para o estudo do reactor. Este facto pode ser justificado com o facto da estrutura estudada computacionalmente não ser geometricamente igual àquela estudada pelo método analítico, bem como, devido a erros computacionais e de discretização, já explicados na secção 1.3.1.3 desta dissertação. Contudo, o valor excedente da tensão equivalente máxima nas tampas, relativamente à tensão admissível, é cerca de 1.08MPa, o que equivale a cerca de 1.34% do valor da tensão admissível. Tendo em conta o coeficiente de segurança adoptado no projecto e os possíveis erros computacionais e de discretização, este excesso não é de todo inviabilizador do projecto nem tão pouco do método de cálculo analítico.

É de referir também que foram efectuadas várias simulações, no sentido de verificar qual a espessura mínima viável da aba da parte lateral, reduzindo-a relativamente à espessura determinada para as tampas, no sentido de: reduzir o comprimento necessário para os parafusos que fazem a ligação entre a parte lateral e as tampas; optimizar essa zona relativamente ao peso do reactor e, consequentemente, à quantidade de material necessária para a produção e construção do reactor; e diminuir os custos de produção do reactor, com a diminuição da quantidade de material necessária. Concluiu-se então que a espessura a adoptar para a aba da parte lateral, foi de 22mm.

5. ANÁLISE DE COMPORTAMENTO: MÉTODO EXPERIMENTAL

5.1. Introdução

Este capítulo inicia-se com a descrição do método experimental utilizado no estudo do vaso, onde é explorado o seu fundamento e feita a análise de pontos específicos do vaso. Esta análise, é efectuada no reactor já construído, tendo este sido concebido com base no projectos analítico e computacional, estudados anteriormente. O vaso de pressão foi testado através da aplicação das condições impostas para este projecto e tendo este sido construído seguindo o dimensionamento calculado através do Método Analítico. A partir daí, mais à frente na presente dissertação, nomeadamente no capítulo 6, os resultados obtidos no presente capítulo serão confrontados com os resultados obtidos através dos Métodos Analítico e Computacional, ou seja, serão comparados os estados de tensão em determinados pontos da estrutura externa do reactor, com os resultados verificados a partir dos capítulos 3 e 4, provando a semelhança ou disparidade entre os resultados dos métodos utilizados e a consistência de cada um deles.

5.2. Método Experimental

O método experimental utilizado no estudo do vaso sujeito a alta pressão e alta temperatura, teve como base teórica aquela que está descrita na secção 1.3.1.4 desta dissertação, nomeadamente, técnicas de medição de deslocamento e extensão, por via da utilização de extensómetros de resistência que, no caso deste trabalho, devido à geometria axissimétrica do próprio reactor, foram utilizados extensómetros de roseta.

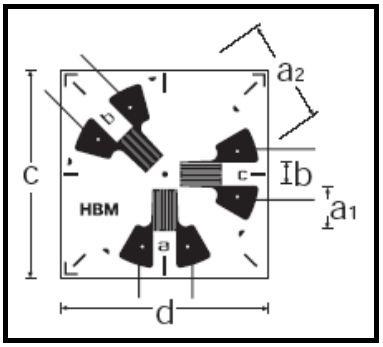


Figura 5.1 – Esquematização da geometria dos extensómetros 1-RC11-4/350 da HBM.

Estes, são tipicamente aplicados em análises de estados de tensão biaxiais com tensões principais com direcções desconhecidas, tendo sido obtidos comercialmente através da empresa HBM, com a ref.ª **1-RC11-4/350** e cuja configuração está esquematizada pela Fig. 5.1.

Este tipo de extensómetros, é constituído por três grelhas de medição, dispostas em forma de roseta 0º/45º/90º, com uma resposta térmica calibrada com a resposta térmica do aço, em que $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6} / ^{o} K$. Os parâmetros geométricos e eléctricos destes extensómetros, estão listados na Tabela 5-1, sendo que as suas características técnicas estão disponíveis no Anexo C.

Resistência Nominal [Ω]	Dimensões [*mm*]					Voltagem Máxima Efectiva Permanente de Excitação da Ponte [*V*]	Terminais de Soldadura
	Grelha de Medição			Suporte da Grelha			
	a_1	a_2	b	c	d		
350	1.1	4	1.1	8	8	3.5	LS7

Tabela 5-1 – Parâmetros geométricos e eléctricos dos extensómetros.

A disposição das grelhas de medição permite conhecer os valores e direcções das primeira e segunda tensão principal a que o material está sujeito.

O princípio da análise experimental de tensões através do uso de extensómetros, consiste na utilização de extensómetros para medir o valor das extensões na superfície do componente. A partir das extensões medidas e conhecendo as propriedades do material do componentes medido (como o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν), é possível determinar o valor absoluto e as direcções dessas tensões. Os cálculos inerentes, têm por base a Lei de Hooke, que se aplica no domínio elástico de materiais lineares elásticos.

Designem-se as três grelhas de medição, que constituem os extensómetros de roseta, por a, b e c. Consequentemente, as extensões medidas por cada uma das grelhas, designam-se por ε_a, ε_b e ε_c.

As tensões normais principais σ_1 e σ_2, para um extensómetro de roseta 0º/45º/90º, são calculadas da seguinte forma:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \tag{5.1}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \tag{5.2}$$

em que, cada uma das extensões, corresponde à medição efectuada pela respectiva grelha, esquematizada pela Fig. 5.2:

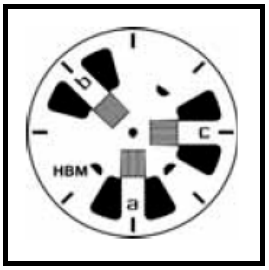


Figura 5.2 – Correspondência das extensões a cada uma das grelhas de medição.

Em baixo, são determinadas as direcções principais. Em primeiro lugar, é calculada a tangente de um ângulo auxiliar ψ que, para o caso de extensómetros em roseta 0º/45º/90º, é dada por:

$$\tan\psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \Big| \quad \frac{N}{D} \tag{5.3}$$

Note-se que, a tangente de um ângulo, num triângulo rectângulo, é dada pela razão entre o cateto oposto (numerador N) e o cateto adjacente (denominador D):

$$\tan\psi = \frac{cateto\ oposto}{cateto\ adjacente} = \frac{N}{D} \tag{5.4}$$

Esta ambiguidade da tangente, torna necessária a determinação dos sinais (positivo ou negativo) do numerador (N) e do denominador (D), antes de efectuar o cálculo final do quociente indicado em cima. A importância da determinação dos sinais dos dois termos, deve-se ao facto destes indicarem o quadrante do arco circular, em que o ângulo ψ se encontra. A partir do valor numérico da tangente, o valor do ângulo ψ pode ser determinado por:

$$|\psi| = \arctan[^{\circ}] \tag{5.5}$$

O ângulo φ pode então ser determinado, através do esquema descrito em baixo:

$$\left.\begin{aligned} \frac{N}{D} &\geq 0 \\ \frac{N}{D} &> 0 \end{aligned}\right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}\left(0^{\circ} + |\psi|\right)$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{N}{D} &> 0 \\ \frac{N}{D} &\leq 0 \end{aligned}\right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}\left(180^{\circ} - |\psi|\right)$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{N}{D} &\leq 0 \\ \frac{N}{D} &< 0 \end{aligned}\right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}\left(180^{\circ} + |\psi|\right) \tag{5.6}$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{N}{D} &< 0 \\ \frac{N}{D} &\geq 0 \end{aligned}\right\} \quad \varphi = \frac{1}{2}\left(360^{\circ} - |\psi|\right)$$

Com o ângulo φ determinado, este deve ser aplicado a partir do eixo da grelha de medição de referência a na direcção matematicamente positiva (direcção anti-horária). O eixo da grelha de medição a corresponde a uma das semi-rectas que delimita o ângulo φ, sendo que a outra semi-recta delimita o ângulo é a direcção principal 1. Esta é a direcção da tensão normal principal σ_1, sendo idêntica à direcção da extensão principal ε_1. O vértice do ângulo φ está localizado no ponto de intersecção dos eixos das grelhas de medição. A direcção principal 2 (direcção da tensão normal principal σ_2) faz um ângulo de $\varphi + 90^{\circ}$.

É ainda de notar que, este tipo específico de extensómetros, é apropriado para ensaios experimentais em condições que atinjam uma gama de temperaturas entre -269º*C* e +250º*C*, sendo que os ensaios foram efectuados a uma temperatura interna de 200º*C*, para além do facto de possuírem uma flexibilidade considerável permitindo um fácil manuseamento dos mesmos.

Os ensaios experimentais foram efectuados tendo em consideração a *Directiva 97/23/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Maio de 1997 relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros sobre equipamentos sobre pressão* [25].

5.3. Estudo Experimental do Vaso

Durante este estudo, foram efectuados vários testes a nível de variação de pressão, a temperatura constante. Concretamente, foi efectuado um total de nove ensaios, em que foram registados todos os valores medidos pelos extensómetros nas situações de pressão máxima (100 ou 150 bar) e mínima (1 bar). Em primeiro lugar, foram efectuados quatro ensaios a uma pressão de 100 bar, no interior do reactor, seguidos de um ensaio a uma pressão de 150 bar (condição fundamental para a validação e homologação de um vaso de pressão, segundo a *Directiva 97/23/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Maio de 1997 relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros sobre equipamentos sobre pressão*), seguido de mais quatro ensaios a uma pressão de 100 bar.

Os extensómetros utilizados nos ensaios, foram colocados em pontos específicos da estrutura principal do reactor. Nomeadamente, no centro do exterior da tampa inferior do vaso e a meia distância do comprimento do exterior da parte cilíndrica do vaso. Ou seja, nas localizações correspondentes aos pontos 2 e 3 do Estudo Computacional feito a esta mesma estrutura. O factor da escolha ter recaído sobre a tampa inferior em detrimento da tampa superior, deve-se ao facto de existirem demasiadas irregularidades (nomeadamente, furos, chanfros, ligações, pernos, etc.) na tampa superior, o que poderia levar a resultados bastante diferentes dos resultados anteriormente obtidos.

Visto isto e depois de efectuados todos os preparativos para a execução dos ensaios (descritos no Anexo C), deu-se início aos ensaios propriamente ditos e lidos os resultados medidos pelos extensómetros, estando entes listados nas Tabelas 5-2 e 5-3.

A partir dos resultados das tabelas abaixo mostradas, é possível então obter as tensões principais e, consequentemente, a tensão equivalente, nos pontos monitorizados. Essas tensões principais são simplesmente obtidas através das Eqs. (5.1) e (5.2) e a correspondente tensão equivalente de *Von Mises* estão apresentadas na Tabela 5-4. Para além disso, estão também apresentadas as respectivas direcções principais.

Tampa Inferior do Reactor				
N.º Ensaio	**Pressão Interna [*bar*]**	**Extensões**		
		ε_a [x10^{-6}]	ε_b [x10^{-6}]	ε_c [x10^{-6}]
1	100	283	285	253
2	100	282	282	254
3	100	283	283	254
4	100	284	284	255
5	150	431	431	396
6	100	284	286	262
7	100	286	288	262
8	100	284	289	262
9	100	285	290	262

Tabela 5-2 – Resultados Experimentais das Extensões na Tampa Inferior.

Zona Cilíndrica do Reactor				
N.º Ensaio	Pressão Interna [*bar*]	Extensões		
		ε_a [x10^{-6}]	ε_b [x10^{-6}]	ε_c [x10^{-6}]
1	100	58	129	209
2	100	63	134	211
3	100	60	136	207
4	100	62	136	206
5	150	95	212	313
6	100	62	138	205
7	100	61	138	205
8	100	60	136	203
9	100	61	136	204

Tabela 5-3 –Resultados Experimentais das Extensões na Zona Cilíndrica.

N.º Ensaio	Tampa Inferior					Zona Cilíndrica				
	Tensões Principais		Direcções Principais		Tensão Equiv. [*MPa*]	Tensões Principais		Direcções Principais		Tensão Equiv. [*MPa*]
	σ_1 [*MPa*]	σ_2 [*MPa*]	ψ [º]	φ [º]		σ_1 [*MPa*]	σ_2 [*MPa*]	ψ [º]	φ [º]	
1	72.5	65.5	18	9.0	**97.9**	46.0	22.7	-2.7	88.6	**56.4**
2	72.0	65.9	19.1	9.6	**97.8**	46.7	23.8	-2.8	88.6	**57.2**
3	72.3	65.9	18.5	9.3	**98.0**	45.7	23.0	-2.9	88.6	**56.0**
4	72.5	66.2	18.6	9.3	**98.4**	45.6	23.4	-2.9	88.6	**55.9**
5	110.0	103.0	23.6	11.8	**151.0**	69.4	35.6	-2.9	88.5	**85.0**
6	72.9	67.6	25.0	12.5	**99.6**	45.4	23.3	-2.9	88.5	**55.6**
7	73.4	67.7	23.0	11.5	**100.0**	45.4	23.1	-2.9	88.5	**55.6**
8	73.2	67.3	25.3	12.6	**99.6**	44.9	22.8	-2.9	88.5	**55.0**
9	73.5	67.3	24.2	12.1	**99.8**	45.1	23.0	-2.9	88.5	**55.3**

Tabela 5-4 – Resultados Experimentais das Tensões e Direcções Principais.

Pegando nos valores das tensões principais e equivalentes dos ensaios 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9, é possível obter os valores médios das tensões principais e equivalente.

Parâmetro	Resultado Médio
Tampa Inferior	
σ_1 [*MPa*]	72.8
σ_2 [*MPa*]	66.7
ψ [º]	21.5
φ [º]	10.7
$\sigma_{equiv.}$ [*MPa*]	98.9
Zona Cilíndrica	
σ_1 [*MPa*]	45.6
σ_2 [*MPa*]	23.1
ψ [º]	-2.9
φ [º]	88.6
$\sigma_{equiv.}$ [*MPa*]	55.9

Tabela 5-5 – Resultados Experimentais Médios.

Por fim, são apresentados os gráficos de evolução das tensões principais e equivalentes, referentes aos dois extensómetros, verificada ao longo dos ensaios efectuados, nas Figuras 5.3 e 5.4.

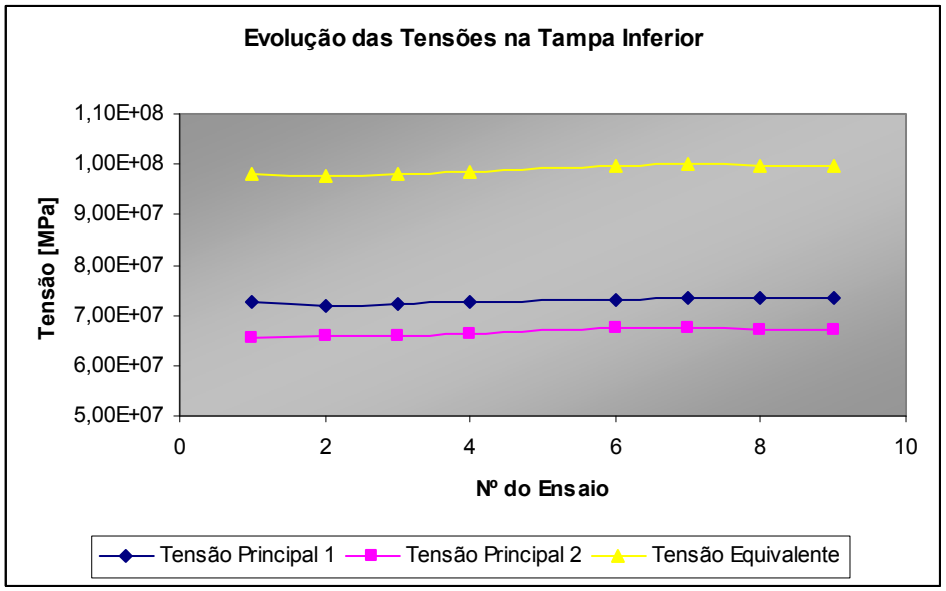


Figura 5.3 – Gráfico da evolução das tensões ao longo dos ensaios realizados, na tampa inferior.

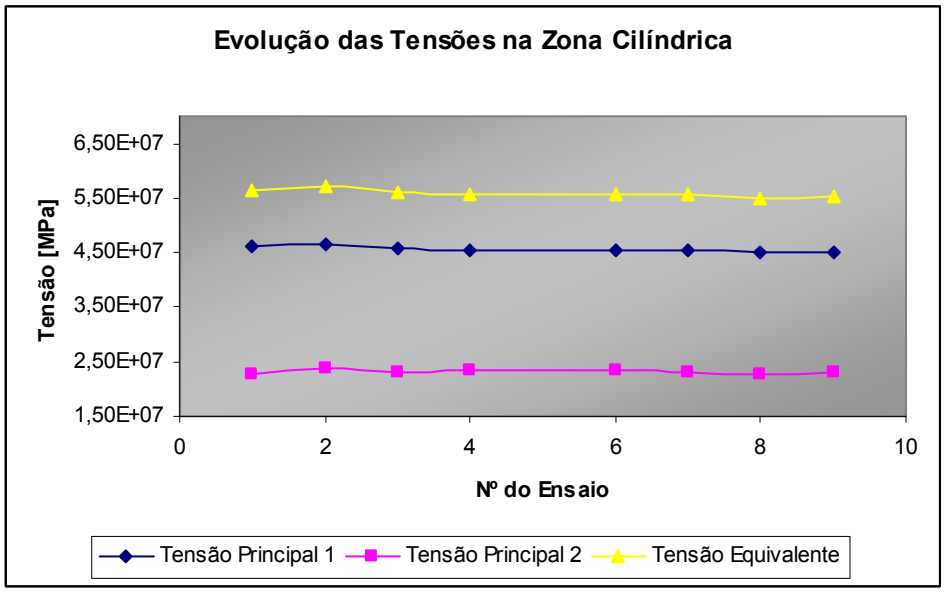


Figura 5.4 - Gráfico da evolução das tensões ao longo dos ensaios realizados, na zona cilíndrica.

5.4. Conclusões Gerais do Estudo Experimental

Face aos resultados experimentais, obtidos através da análise da estrutura pelo Método Experimental, é possível concluir à partida que, a evolução das tensões (principais e equivalente) a que o material está sujeito, mostram uma estabilidade e linearidade das mesmas, mesmo depois do material ter sido sujeito a um ensaio com 150% de carga. Para além disso, é de notar que, a tensão equivalente na zona cilíndrica é bastante inferior à tensão admissível e muito próxima da tensão obtida analítica e computacionalmente, ao invés da tensão equivalente obtida na tampa inferior, que

para além de ser superior à tensão admissível (80.4*MPa*) é também superior à tensão obtida em simulação e analiticamente. Este facto pode-se obviamente dever a diversos factores, nomeadamente, ao posicionamento do extensómetro relativamente ao centro da tampa, onde as três grelhas de medição são solicitadas simultaneamente nas três direcções respectivas, podendo assim criar um desvio do valor real de cada uma das extensões lidas pelo próprio extensómetro. Contudo, é de notar a coerência das tensões principais no centro da tampa inferior, em que apesar de não serem iguais (o que demonstra que o posicionamento do extensómetro não ficou perfeitamente centrado na tampa), os seus valores mantêm-se praticamente constantes ao longo de todos os ensaios.

Por fim, é ainda de referir que, segundo os valores obtidos no ensaios, a tensão a que o material se sujeitou nunca atingiu o seu valor limite de elasticidade, o que implica que nunca entrou em domínio plástico o que, consequentemente, justifica a linearidade dos resultados.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1. Introdução

Este capítulo inicia-se com o confronto e discussão, dos resultados obtidos através da análise efectuada pelos Métodos Analítico, Computacional e Experimental, apresentados nos capítulos 3, 4 e 5. A comparação entre os vários resultados, leva à constatação da coerência ou incoerência entre eles, bem como da consistência ou inconsistência dos três métodos.

Por fim, é apresentado o conceito final do reactor que foi projectado, estudado, produzido, construído e testado no decorrer de todo este trabalho. Sendo que, a estrutura metálica externa do conceito final apresentado na secção 6.3 consiste na estrutura que foi também utilizada para a obtenção dos resultados pelo Método Experimental.

6.2. Comparação dos Resultados Obtidos nos Métodos Estudados

Neste capítulo serão por fim confrontados os resultados relativos ao comportamento mecânico da estrutura principal do reactor de alta pressão e alta temperatura, por forma a retirar as ilações relativamente à consistência de todo o projecto, bem como dos próprios métodos de projecto adoptados.

Para tal, foi efectuado um estudo paralelo, com recurso aos três métodos de projecto e análise utilizados, onde foram determinados os valores de tensão para os principais pontos de estudo (centro da face exterior da tampa inferior do reactor e ponto médio da face exterior da zona cilíndrica), seguindo exactamente os mesmos critérios e métodos utilizados nos capítulos anteriores. Foram então encontradas as tensões principais e equivalente (mais uma vez, encontrada através do critério de Von Mises), para uma sequência de valores de pressão interna aplicada no interior do caso de pressão, desde a pressão atmosférica (1 bar) até uma pressão de 63 bar, com incrementos de 5 em 5 bar (excepto o último incremento, que foi de 2 bar). Os valores encontrados para este estudo paralelo estão enunciados na Tabela 6-1.

Para além disso, por forma a facilitar a comparação entre os vários resultados, são disponibilizados 6 gráficos que comparam as tensões principais 1 e 2 e a tensão equivalente de cada método, em cada um dos pontos estudados.

A partir dos resultados disponibilizados, é possível observar que, tanto nos resultados referentes ao método analítico como nos resultados referentes ao método computacional, a linearidade destes com o aumento da pressão interna do reactor, é evidente. Ao invés, no caso do método experimental,

essa linearidade também existe, embora hajam alguns pontos de curvatura, provavelmente causados por erros de leitura, latência do sistema de aquisição de dados dos extensómetros, variações de temperatura, etc.

Zona Cilíndrica											
Pressão [bar]	Método Analítico				Método Computacional				Experimental		
	σ_θ [MPa]	σ_z [MPa]	σ_r [MPa]	σ_{eq} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_{eq} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_{eq} [MPa]
6	3,32	1,36	0,60	**3,40**	2,78	1,45	0	**3,41**	2,68	1,44	**3,28**
11	6,10	2,50	-1,10	**6,24**	5,11	2,67	0	**6,26**	4,89	2,57	**5,99**
16	8,87	3,64	-1,60	**9,07**	7,43	3,89	0	**9,11**	6,85	3,44	**8,39**
21	11,65	4,77	-2,10	**11,90**	9,75	5,10	0	**11,95**	9,47	4,68	**11,60**
26	14,42	5,91	-2,60	**14,74**	12,08	6,32	0	**14,80**	12,00	6,28	**14,70**
31	17,19	7,05	-3,10	**17,57**	14,40	7,54	0	**17,64**	13,70	6,88	**16,80**
36	19,96	8,18	-3,60	**20,41**	16,72	8,75	0	**20,49**	16,20	8,49	**19,90**
41	22,74	9,32	-4,10	**23,24**	19,04	9,97	0	**23,33**	18,60	9,67	**22,80**
46	25,51	10,5	-4,60	**26,08**	21,37	11,18	0	**26,18**	21,30	10,90	**26,10**
51	28,28	11,6	-5,10	**28,91**	23,69	12,40	0	**29,02**	22,40	11,40	**27,40**
56	31,05	12,7	-5,60	**31,74**	26,01	13,61	0	**31,87**	25,40	12,90	**31,10**
61	33,83	13,9	-6,10	**34,58**	28,33	14,83	0	**34,71**	26,70	13,40	**32,70**
63	34,94	14,3	-6,30	**35,71**	29,26	15,31	0	**35,85**	28,60	14,90	**35,10**

Tampa Inferior								
Pressão [bar]	Método Analítico	Método Computacional				Experimental		
	σ_{eq} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_{eq} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_{eq} [MPa]
6	**4,46**	4,88	4,88	0	**4,88**	3,69	3,00	**4,81**
11	**8,19**	8,96	8,96	0	**8,96**	7,40	6,75	**10,00**
16	**11,90**	13,04	13,04	0	**13,04**	11,00	9,88	**14,80**
21	**15,60**	17,11	17,11	0	**17,11**	14,70	13,10	**19,70**
26	**19,30**	21,19	21,18	0	**21,18**	18,10	16,60	**24,60**
31	**23,00**	25,26	25,26	0	**25,26**	22,00	20,00	**29,80**
36	**26,80**	29,33	29,33	0	**29,33**	25,80	23,40	**34,90**
41	**30,50**	33,41	33,41	0	**33,41**	29,60	26,80	**40,00**
46	**34,20**	37,48	37,48	0	**37,48**	33,50	31,90	**46,30**
51	**37,90**	41,56	41,56	0	**41,55**	36,50	33,50	**49,60**
56	**41,70**	45,63	45,63	0	**45,63**	41,30	37,40	**55,90**
61	**45,40**	49,70	49,70	0	**49,70**	44,20	40,50	**60,00**
63	**46,90**	51,33	51,33	0	**51,33**	46,50	42,10	**62,80**

Tabela 6-1 – Valores Obtidos no Estudo Comparativo.

É também de notar que, à medida que a pressão interna aumenta, os valores dos três métodos vão divergindo ligeiramente, embora essa divergência seja mais evidente no caso da tampa inferior do reactor. Contudo, no caso da zona cilíndrica, a evolução das tensões obtidas pelos três métodos é, como se pode observar, muito consistente e coerente, visto que as linhas correspondentes à tensão equivalente evoluem de forma muito compacta, sobrepostas (excepto em pequenos troços) e em concordância. No caso da tampa inferior, as divergências existentes são mais evidentes entre o método experimental e os métodos analítico e computacional, do que entre o método analítico e o

computacional. Essas diferenças entre os métodos de análise, são tanto mais evidentes quanto maior for a pressão interna, dado que esta potencia o desvio dos valores, provocando as divergências evidenciadas nos gráficos apresentados.

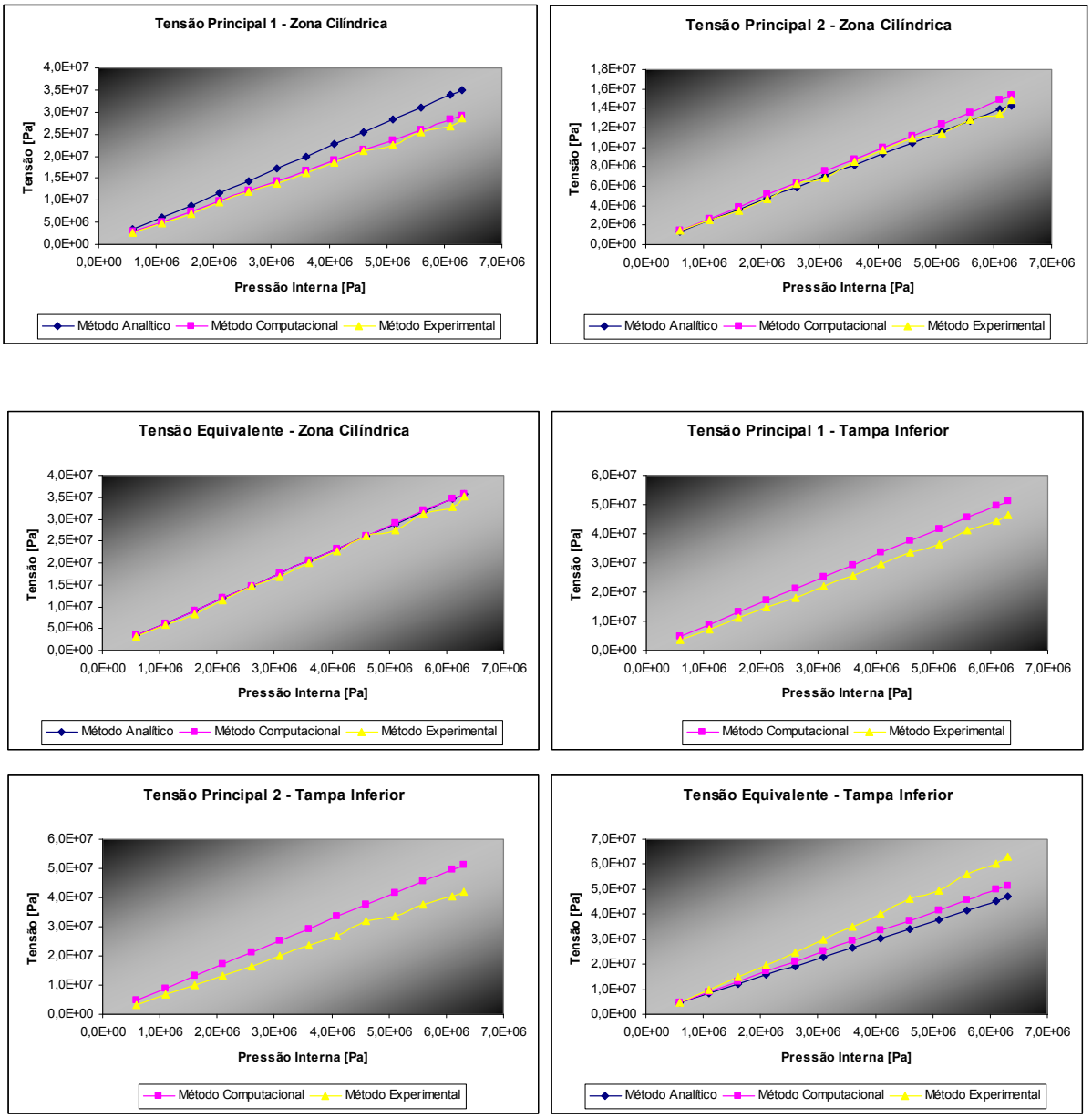


Figura 6.1 – Gráficos comparativos dos resultados dos obtidos no estudo paralelo.

6.3. Conceito Final

Nesta secção está então apresentado o conceito final, projectado, estudado, construído e ensaiado no decorrer de toda esta dissertação, estando assim demonstrado que é um conceito fiável e viável para as pretensões e objectivos a que se destina, assumindo a capacidade de promover todos os

requisitos que se propôs e, mais importante que tudo, garantindo a segurança das pessoas que o irão operar no futuro. O conceito encontra-se registado na Figura 6.1:

Figura 6.2 – Conceito final produzido e testado do reactor de alta pressão e alta temperatura.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. Conclusões

Em forma de conclusão, existem os seguintes pontos de relevância a enumerar:

- Segundo os resultados obtidos, os três métodos utilizados no desenvolvimento e análise do reactor de alta pressão e alta temperatura estudado, revelaram uma coerência bastante consistente entre eles, o que leva a entender que, todos têm uma validade substancial relativamente ao comportamento real do material, embora o método experimental tenha a vantagem de poder recrear, traduzir e introduzir todos os factores (por mais pequenos ou desprezáveis que sejam, na teoria) nos valores apresentados por este método.
- Tanto o resultado analítico como até mesmo o resultado computacional apresentam diferenças muito pequenas, relativamente ao método experimental: um máximo de 6% de diferença entre os valores das tensões equivalentes de Von Mises do método experimental relativamente aos restantes métodos, no caso da zona cilíndrica da estrutura principal do reactor.
- No caso da tampa inferior do reactor, a diferença máxima entre os resultados do método experimental e os restantes métodos, é de cerca de 18% (neste caso, existe uma média de diferença entre métodos de cerca de 10%) de diferença entre os valores das tensões equivalentes de Von Mises do método experimental relativamente aos restantes métodos, no caso da tampa inferior do reactor. Este facto deve-se a vários factores:
    - Devido à falta de experiência em oficina, não ter sido possível obter tolerâncias muito apertadas na produção das peças e, consequentemente, estas não terem exactamente as dimensões com as quais as peças foram modeladas no método computacional e dimensionadas pelo método analítico;
    - Existem alguns pequenos (embora evidentes) desvios, nos valores obtidos experimentalmente, devendo-se a vários factores como a colocação e estabilidade dos extensómetros de resistência, da própria ponte de Wheatstone, do sistema de medição, das soldaduras entre os fios de ligação, de diferenças de temperatura entre cada ensaio, etc.;
    - Erros comuns em experiências laboratoriais ligados a erros na precisão dos conversores e leitores de dados, erros de leitura, instabilidades no sistema, etc.
- Contudo, a quase linearidade dos resultados obtidos experimentalmente é evidente, o que demonstra que, embora nem todas as leituras tenham tido sucesso, a grande maioria segue um padrão bastante vincado e coerente, levando então a concluir que, os resultados gerais (ou médios) obtidos através dos três métodos utilizados no estudo do reactor, são fiáveis e viáveis, embora no caso da tampa inferior tenha sido verificada a maior divergência de

resultados entre eles, é necessário ou aconselhável ter alguma cautela no projecto (pelo método computacional e principalmente, pelo método analítico) de geometrias desse género, quando sujeitas a condições iguais ou semelhantes.

Em jeito de finalização, é importante referir que, no decorrer deste trabalho, as dificuldades inerentes a um trabalho desta dimensão foram surgindo dia após dia e as próprias soluções a essas dificuldades, traziam novos problemas a necessitar de uma solução. Contudo, a vontade e ambição de concluir este projecto, levaram a ultrapassar todos esses obstáculos e, agora no final, a ver todo um trabalho desenvolvido com sucesso, onde os muitos requisitos exigidos foram preenchidos, onde a procura intensiva por novas soluções a nível de materiais e a nível estrutural e conceptual levaram ao alargamento dos horizontes nesses campos e ao desenvolvimento do *know-how* nessas áreas.

Resta ainda dizer que, todo o conhecimento adquirido no desenvolvimento deste trabalho, o primeiro contacto com a indústria, a logística a nível de recursos e de matéria-prima, as centenas de horas de experiência ganhas em trabalho de oficina e toda a pesquisa (a vários níveis: estado da arte, novas tecnologias, novos materiais disponíveis com características de extrema versatilidade, novas soluções a nível de ligações e instrumentação, etc.) necessária à realização deste trabalho, foram, todos eles, factores que contribuíram de uma forma incalculável para a minha formação, desenvolvimento profissional e pessoal.

7.2. Sugestões

Ao longo da investigação realizada no decorrer do trabalho apresentado, foram identificados, para os vários métodos utilizados na análise de comportamento da estrutura principal do reactor e na sua própria concepção, alguns aspectos que se pensa que poderiam incrementar a qualidade dos resultados obtidos, bem como, solucionar alguns problemas que poderão surgir no futuro, a nível funcional. Observando isto, e para cada um dos métodos estudados, são enunciados seguidamente os aspectos que, por certo, serão tratados em trabalhos futuros.

No caso do Método Analítico, propõe-se:

- Aprofundamento do método de cálculo e alargamento do mesmo às especificações reais do problema estudados, nomeadamente, a existência das abas na estrutura cilíndrica, das ligações aparafusadas e soldadas.
- Análise dos pormenorizada dos interfaces existentes na tampa superior do reactor.

No caso do Método Computacional, propõe-se:

- Uma análise aprofundada a pontos críticos e fragilizados da estrutura principal, como é o caso de todos os furos existentes na tampa superior do reactor, onde são assemblados os interfaces entre o interior e o exterior.

- Uma modelação mais aproximada da realidade, no sentido de conferir uma maior consistência aos resultados referentes às situações como as das ligações aparafusadas e soldadas.
- Uma simulação mais exaustiva, nomeadamente, no que diz respeito às situações acima referidas.

No caso do Método Experimental, propõe-se:

- Em concordância com o aprofundamento dos estudos analítico e computacional nas situações referidas, efectuar um número de ensaios mais exaustivo.
- Análise e comparação dos resultados analítico e computacional, nas zonas das ligações (aparafusadas, soldadas e de interface) com recursos a ensaios de extensometria nessas zonas.
- Criar condições e efectuar ensaios de extensometria no interior do reactor, nomeadamente, nas faces interiores das tampas planas e da estrutura cilíndrica, por forma a obter e comparar resultados nessas mesmas zonas, com os resultados analíticos e computacionais já efectuados neste trabalho.

Em termos de funcionalidade, propõe-se:

- Um estudo e solução alternativa e mais eficaz do sistema de formação da câmara interna do reactor.
- Um estudo e solução alternativa do conceito relativo ao sistema de fixação da membrana intermédia que separa as duas câmaras.
- Projecto, estudo e desenvolvimento de um sistema de suporte para o reactor, por forma a suspendê-lo e a facilitar o acoplamento/desacoplamento da tampa superior do mesmo, de modo a facilitar o acesso e a permitir uma mais rápida montagem e desmontagem dos vários componentes e interfaces.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Hamrock, B. J.; Jacobson, B.; Schmid, S. R.; "*Fundamentals of Machine Elements*"; McGraw-Hill; USA; 1999.

[2] Branco, C. A. G. M.; "*Mecânica dos Materiais*"; Fundação Calouste Gulbenkian; 3ª ed.; Porto; 1998.

[3] Beer, F. P.; Johnston, E. R.; "*Mechanics of Materials – in SI Units*"; 2nd ed.; McGraw-Hill; USA; 1992.

[4] Bednar, H. H.; "*Pressure Vessel Design Handbook*"; 2nd ed.; Krieger Publishing Company; Malabar, Florida, USA; 1986.

[5] Young, W. C.; Budynas, R. G.; "*Roark's Formulas for Stress and Strain*"; 7th ed.; McGraw-Hill; USA; 2002.

[6] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*"; 5th ed.; John Wiley & Sons; USA; 2002.

[7] Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; "*Mechanical Engineering Design*"; 6th ed.; McGraw-Hill; USA; 2001.

[8] Cunha, L. V.; "*Desenho Técnico*"; 10ª ed.; Fundação Calouste Gulbenkian; Lisboa; 1997.

[9] Gierk, R.; Gierk, K.; "*Manual de Fórmulas Técnicas*"; 4ª ed.; Dinalivro; 1996.

[10] Wills, J. G.; "*Nuclear Power Plant Technology*"; Wiley; New York; 1967.

[11] Martinho, E. J. C.; "*Reactores Nucleares de Cisão: o que são e como funcionam*"; Instituto de Energia; Sacavém; 1980.

[12] Parkes, E. W.; "*A Design Philosophy for Repeated Thermal Loading*"; AGARD; Paris; 1958.

[13] Holmes, D. R.; Rahmel, A.; "*Materials and Coating to Resist High Temperature Corrosion*"; Applied Science Publishers; Londres; 1978.

[14] Bradley, E. F.; "*Source Book on Materials for Elevated-Temperature Applications: A Comprehensive Collection of Outstanding Articles from the Periodical and Reference Literature*"; American Society for Metals; Ohio; 1979.

[15] Touloukian, Y. S.; Makita, T.; "*Specific Heat, Nonmetallic Liquids and Gases*"; IFI/Plenum; New York; 1970.

[16] Touloukian, Y. S.; Saxena, S. C.; Liley, P. E.; "*Thermal Conductivity, Nonmetallic Liquids and Gases*"; New York; 1970.

[17] Mitlitsky, F.; Myers, B.; Weisberg, A. H.; Leonida, A.; "*Applications and Development of High Pressure PEM Systems*"; Lucerne, Switzerland; 1999.

[18] Tam, W. H.; Ballinger, I. A.; Kuo, J.; Lay, W. D.; McCleskey, S. F.; Morales, P.; Taylor, Z. R.; Epstein, S. J.; "*Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Xenon Conical Pressure Vessel*"; 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference; Lake Buena Vista, Florida, USA; 1996.

[19] Tam, W. H.; Debreceni, M. J.; Hersh, M. S.; Nye, C. D.; "*Low Cost Derivative Tanks for Spacecraft and Launch Vehicles*"; 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit; Los Angeles, California, USA; 1999.

[20] Back, D. D.; Ramos, C.; Meyer, J. A.; "*Low Pressure Long-Term Xenon Storage for Electric Propulsion*"; NASA/CR—2001-210765/REV1; Rockledge, Florida, USA; 2001.

[21] Jenks, C. W.; "*Technology Assessment of Refuelling-Connection Devices for CNG, LNG and Propane*"; Research Results Digest; number 25; Transit Cooperative Research Program; 1998.

[22] Todoroki, M.; Hara, K.; Kudo, A.; Sakata, T.; "*Eletrochemical Reduction of High Pressure CO_2 at Pb, Hg and In Electrodes in an Aqueous $KHCO_3$ Solution*"; Journal of Electroanalytical Chemistry; number 394; pages 199-203; 1995.

[23] Hara, K.; Kudo, A.; Sakata, T.; "*Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide Under High Pressure on Various Electrodes in an Aqueous Electrolyte*"; Journal of Electroanalytical Chemistry; number 391; pages 141-147; 1995.

[24] Caloz, F.; Fenter, F. F.; Tabor, K. D.; Rossi, M. J.; "*Design and Construction of a Knudsen-Cell Reactor for the Study of Heterogeneous Reactions Over the Temperature Range 130-750ºK: Performances and Limitations*"; American Institute of Physics; USA; 1997.

[25] Directiva 97/23/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Maio de 1997 relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros sobre equipamentos sob pressão; Jornal Oficial das Comunidades Europeias – PT; págs. 1-55; Bruxelas, Bélgica; 1997.

[26] Roy, R. J.; Critz, K. M.; Leonida, A.; "*Electrode Plate Structures for High-Pressure Electrochemical Cell Devices*"; United States Patent; Patent No.: US 6.171.719 B1; USA; 2001.

[27] Shiepe; J. K.; Dristy, M. E.; Molter, T. M.; Moulthrop, L. C., Jr.; "*Method for Operating a High Pressure Electrochemical Cell*"; United States Patent; Patent No.: US 6.365.032 B1; USA; 2002.

[28] Bellas, R. F.; Jeffrey, D. D.; "*Carbonation System and Method*"; United States Patent; Patent No.: US 6.935.624 B2; USA; 2005.

[29] Engineering Fundamentals; "*Pressure Vessels*" e "*Rosette Strain Gages*" - **http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/index.cfm** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[30] Freitas, R. A., Jr.; "*Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities*"; Landes Bioscience; Georgetown, Texas, USA; 1999 - **http://www.nanomedicine.com/NMI/10.3.1.htm** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[31] Zick, L. P.; "*Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports*"; Welding Journal Research Supplement; 1951 - **http://www.codeware.com/support/papers/zick.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[32] Ko, W. L.; "*Thermocryogenic Buckling and Stress Analyses of a Partially Filled Cryogenic Tank Subjected to Cylindrical Strip Heating*"; NASA Technical Memorandum 4579; 1994 - **http://dtrs.dfrc.nasa.gov/archive/00001011/01/4579.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[33] Wands, B.; "*Stress Analysis of a Flare Liquid Argon Tank*"; 2004 - **http://home.fnal.gov/~rafael/FLARE_files/Wands_Stress%20Analysis%20of%20FLARE%20Tank_b.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[34] Greiner, R.; Ofner, R.; "*Large Cylindrical Flat-Bottom Storage Tanks – Design Calculations for Seismic Effects*"; Graz University of Technology, Institute for Steel, Timber and Shell Structures; Graz, Austria; 2003 - **http://www.shf.tugraz.at/pdf/publication/miscellaneous/greiner_tank_prag2003.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[35] "*Approval Standard for – Ground Supported, Flat-Bottom Steel Tanks for Fire Pump Suction*"; Class Number 4020/4021; FM Approvals LLC; USA; 2005 - **http://fmglobal.com/approvals/resources/approvalstandards/4020.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[36] Atkinson, C.; Chapman, C.; Cihlar, M.; Kezin, S.; Kumar, A.; Mandula, J.; Szczepaniec, A.; "*Nuclear Power Plant Design Characteristics – Structure of Nuclear Power Plant Design Characteristics in the IAEA Power Reactor Information System (PRIS)*"; International Atomic Energy Agency (IAEA); IAEA-TECDOC-1544; Vienna, Austria; 2007 - **http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1544_web.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007

[37] Calvert, J. D.; "*EPA/OSHA Joint Chemical Accident Investigation Report*"; EPA 550-F-98-01; USA; 1998 - **http://yosemite.epa.gov/oswer/ceppoweb.nsf/vwResourcesByFilename/surpass.pdf/$File/surpass.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[38] Gao, H.; "*EN175: Advanced Mechanics of Solids*"; Division of Engineering - Brown University; USA; 2006 - **http://www.engin.brown.edu/courses/En175/** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[39] Grieve, D. J.; "*Buckling of a Cylinder*"; Faculty of Technology – University of Plymouth; UK; **2006 - http://www.tech.plym.ac.uk/sme/desnotes/buckrov.htm** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[40] Mendonça, P. T. R.; "*Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche – Projecto e Análise*"; Manole; 1ª ed.; Brasil; 2005 - **http://www.grante.ufsc.br/mendonca/c2.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[41] Mesquita, A. D.; "*Novas Metodologias e Formulações para o Tratamento de Problemas Inelásticos com Acoplamento MEC/MEF Progressivo*"; Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo; São Carlos, Brasil; 2002 - **http://www.set.eesc.usp.br/pdf/download/2002DO_ArthurDMesquita.pdf** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[42] Roymech – "*Strength Grade of Bolts and Screw*"; UK; **http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Screws/Strength.htm** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[43] McBride, D.; "*Bolts*"; **http://www.geocities.com/dtmcbride/home_garden/bolts.html** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[44] Matweb; "*Material Property Data*"; **http://www.matweb.com/index.asp?ckck=1** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[45] AZoM; "*The A to Z Materials and AZojomo – The 'AZo Journal of Materials Online'*"; **http://www.azom.com/default.asp** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[46] Allorings.com; "*O-Ring Sizing Chart*" - **http://www.allorings.com/size_cross_reference_framed.htm** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

[47] Allorings.com; "*Static O-Ring Gland Design*" - **http://www.allorings.com/gland_static_axial.htm** - verificado a 7 de Outubro de 2007.

ANEXOS

A. MATERIAIS E FORNECEDORES

A.1. Especificação dos Materiais e Instrumentos Utilizados

A.1.1. Aço Inoxidável Classe 316L

Composição Química

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Ti [%]
0.03 máx	2.0 máx	0.045 máx	0.030 máx	1.0 máx	16.0 a 18.0	10.0 a 14.0	2.00 a 3.00	0.5 max

Propriedades mecânicas à temperatura ambiente

Propriedades	Fornecimento	Típico	Mínimo
Tensão de Rotura [*MPa*]	510	570	485
Tensão de Cedência [*MPa*]	206	300	170
Alongamento [%] (Percentagem em L = 5.65 S_o)	-	60	40
Dureza (Brinell)	-	165	-
Tensão Limite de Fadiga, [*MPa*]	-	260	-

Temperatura Máxima de Serviço Recomendada
Serviço Contínuo 925°C
Serviço Intermitente 870°C

Resistência a Corrosão
1. Meio Aquoso

Temperatura [°C]	20						80					
Concentração [% de massa]	10	20	40	60	80	100	10	20	40	60	80	100
Ácido Sulfúrico	0	1	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2
Ácido Nítrico	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
Ácido Fosfórico	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2
Ácido Fórmico	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0

Legenda: 0 = resistente – corrosão menor que 100 μm/ano
1 = parcialmente resistente – corrosão entre 100 e 1000 μm/ano
2 = não resistente – corrosão maior que 1000 μm/ano

2. Meio Gasoso
Comparação do comportamento do Aço 316 com outros metais, em vários ambientes. Taxa de corrosão baseada numa exposição de 5 anos.

Ambiente	Taxa de Corrosão [*μm/ano*]		
	Aço 316	Alumínio	Aço Macio
Rural	0.0025	0.025	5.8
Marinho	0.0076	0.432	34.0
Industrial-Marinho	0.0051	0.686	46.2

Tratamento Térmico
1. Recozimento Aquecimento a uma gama de temperaturas entre 1010°C e 1120°C e arrefecimento rápido a ar ou água. A melhor resistência à corrosão é obtida quando a temperatura final de recozimento se situar acima de 1070°C.

2. Alívio de Tensões Aquecimento a uma gama de temperaturas entre 200 e 400°C e arrefecimento ao ar.
3. Trabalho a Quente Pressão e forjagem inicial: 1150~1200ºC; Temperatura de acabamento: acima dos 900ºC; Para operações de esmagamento, as forjagens deverão ser terminadas numa gama de temperaturas entre 930~980ºC. Todas as operações de trabalho a quente, deverão ser seguidas de recozimento.
Trabalho a Frio
O aço 316L, sendo extremamente tenaz e dúctil, pode ser prontamente trabalhado a frio. Tipicamente as operações incluem flexão, moldagem, esmagamento e estampagem profunda.

A.1.2. Macor®

Macor is an outstanding engineering material and is machinable with ordinary metalworking tools. Macor is also a problem solving material combining the performance of a technical ceramic with the versatility of a high performance plastic.
Macor has a high use temperature (800°C continuous to 1,000°C peak). It has a low thermal conductivity and is a useful high temperature insulator as well as an excellent electrical insulator. Macor has no porosity and when properly baked out, will not outgas. It is strong and rigid and, unlike high temperature plastics, will not creep or deform. Macor is also radiation resistant. Macor is pure white and can be highly polished. It can be thick or thin film metallised, brazed and epoxy bonded. Another major advantage of this unique material is that, even in small quantities, components are economical to manufacture.

Mechanical Properties		
	Metric	**Imperial**
Density	2.52 g/cm^3	157 lbs/ft^3
Porosity	0%	0%
Young's Modulus, 25ºC (Modulus of Elasticity)	66.9 GPa	9.7x10^{6}psi
Poisson's Ratio	0.29	0.29
Shear Modulus, 25ºC	25.5GPa	3.7x10^{6}psi
Hardness, Knopp, 100g	250	250
Hardness, Rockwell A	48	48
Modulus of Rupture, 25ºC (Flexural Strength)	94 MPa	13,600psi
Compressive strength	345 MPa	50,000 psi
Fracture Toughness	1.53 MPa m$^{0.5}$	1,390 psi in$^{0.5}$
Thermal Properties		
Coefficient of Expansion		
-200 - 25ºC	74x10^{-7}/ºC	41x10^{-7}/ºF
25 - 300ºC	93x10^{-7}/ºC	52x10^{-7}/ºF
25 - 600ºC	114x10^{-7}/ºC	63x10^{-7}/ºF
25 - 800ºC	126x10^{-7}/ºC	70x10^{-7}/ºF
Specific Heat, 25ºC	.79 KJ/kgºC	0.19 Btu/lbºF
Thermal Conductivity, 25ºC	1.46 W/mºC	10.16 Btu in hr ft^{2}ºF
Thermal Diffusivity, 25ºC	7.3x10^{-7}m2/s	0.028 ft^2/hr
Continuous Operating Temperature	800ºC	1,472ºF
Maximum No Load Temperature	1,000ºC	1,832ºF
Electrical Properties		
Dielectric Constant, 25°C		
1 KHz	6.03	6.03
8.5 GHz	5.67	5.67
Loss Tangent, 25°C		
1 KHz	4.7x10^{-3}	4.7x10^{-3}
8.5 GHz	7.1x10^{-3}	7.1x10^{-3}
Dielectric Strength (AC) average (at 12 mil thickness and 25°C)	9.4 KV/mm	785 V/mil
Dielectric Strength (DC) average (at 12 mil thickness and 25°C)	62.4 KV/mm	5,206 V/mil
DC Volume Resistivity, 25°C	>10^{16} ohm-cm	>10^{16} ohm-cm

A.1.3. Parafusos *NPT*, Ligações de Portas e Válvulas

Ordering #: SS-100-1-4
Description: SS Swagelok Tube Fitting, Male Connector, 1/16 in. Tube OD x 1/4 in. Male NPT
Specification Summary
Body Material Stainless Steel
Body Type Male connector
Series Swagelok tube and adapter fittings
End Connection 1 Size 1/16 in
End Connection 1 Type Swagelok® tube fitting
End Connection 2 Size 1/4 in
End Connection 2 Type Male NPT
Cleaning Swagelok SC-10

Ordering #: SS-401-PC
Description: SS Swagelok Tube Fitting, Port Connector, 1/4 in. Tube OD
Specification Summary
Body Material Stainless Steel
Body Type Port connector
Series Swagelok tube and adapter fittings
End Connection 1 Size 1/4 in
End Connection 1 Type Swagelok® port connector
End Connection 2 Size 1/4 in
End Connection 2 Type Fractional Swagelok® tube adapter
Cleaning Swagelok SC-10

Ordering #: SS-62XPS4
Description: SS 3-Piece 60 Series 3-Way Ball Valve, Reinforced PTFE Seats, 6 mm Tube Fitting x 6 mm Tube Fitting x 1/4 in. FNPT
Specification Summary
Flow Pattern Switching (3-way)
Service Class General
Size 1/4 in. Nominal - 62 Series
Valve Material Stainless Steel
End Connection 1 Size 6 mm
End Connection 1 Type Swagelok metric tube fitting
End Connection 2 Size 6 mm
End Connection 2 Type Swagelok metric tube fitting
End Connection 3 Size 1/4 in

End Connection 3 Type Female NPT
Handle Color Black
Handle Style Lever
Approval No Approval
Ball/Stem Material Stainless Steel
Cleaning Swagelok® Standard cleaning SC-10
Fastener Material 316 Stainless Steel
Flange Seal Material Fluorocarbon FKM
ID Tag No
Laser Etch No
Low Dead Space Insert No
Packing Reinforced PTFE
Seat Material Reinforced PTFE
Seat Spring Material 316 Stainless Steel
Stem Bearing Material Alloy X750
Testing Testing according to WS-22
Max Temperature Pressure Rating 450°F @ 100 PSIG /232°C @ 6.8 BAR
Room Temperature Pressure Rating 1000 PSIG @ 100°F /68.9 @ BAR 37°C

Ordering #: SS-400-3-4TFT
Description: SS Swagelok Tube Fitting, Female Run Tee, 1/4 in. Tube OD x 1/4 in. Female NPT x 1/4 in. Tube OD
Specification Summary
Body Material Stainless Steel
Body Type Tee
Series Swagelok tube and adapter fittings
End Connection 1 Size 1/4 in
End Connection 1 Type Swagelok® tube fitting
End Connection 2 Size 1/4 in
End Connection 2 Type Female NPT
End Connection 3 Size 1/4 in
End Connection 3 Type Swagelok® tube fitting
Cleaning Swagelok SC-10

Ordering #: SS-4R3A
Description: SS High-Pressure Proportional Relief Valve, 1/4 in. Swagelok Tube Fitting
Specification Summary
Valve Material 316 Stainless Steel
End Connection 1 Size 1/4 in
End Connection 1 Type Swagelok® tube fitting
End Connection 2 Size 1/4 in
End Connection 2 Type Swagelok® tube fitting
Cleaning Swagelok SC-10
Seal Material Fluorocarbon FKM
Max Temperature with Pressure Rating 250°F @ 4910 PSIG /121°C @ 338 BAR
Room Temperature Pressure Rating 6000 PSIG @ 100°F /413 BAR @ 37°C

Ordering #: 177-R3A-K1-D
Description: Orange Spring Kit for R3A Series Proportional Relief Valves, 1500 to 2250 psig (103 to 155 bar)
Specification Summary
Body Material S17700 Stainless Steel
eClass 37010634
Feature 1500-2250 PSI (Adjustable)
Rupture Pressure 1500-2250 PSI (Adjustable)
UNSPSC Code 40141606

Ordering #: SS-400-P
Description: Stainless Steel Plug for 1/4 in. Swagelok Tube Fitting
Specification Summary
Body Material Stainless Steel
Connection 1 Size 1/4 in.
Connection 1 Type Fitting Plug
eClass 37020718
UNSPSC Code 40141706

A.1.4. Manómetros

Ordering #: PGI-63B-LG25-LAOX
Description: Industrial Pressure Gauge, Bayonet Ring, 63 mm, 0 to 25 MPa, kgf/cm2 secondary, Lower Mount, 1/4 in. MNPT
Specification Summary
Dial Face Size 2 1/2 in. (63 mm)
eClass 27200601
Liquid Fill Unfilled
Mounting Style Lower Mount
UNSPSC Code 41112400

A.1.5. Superwool 607

Superwool 607™ MAX Paper

- Made from highly soluble calcium-magnesium silicate
- High strength superwool paper designed for use as a high temperature gasket material
- Also can be used for expansion joints, thin thermal breaks and to prevent bonding of components
- Excellent thermal insulation
- Efficient insulation for temperatures of up to 1200°C
- Density 210 kg/m³
- Thermal Conductivity 0.09 (at 400°C) 0.14 (at 600°C) W/m•K

A.2. Fornecimento

A.2.1. Aço Inoxidável Classe 316L

Encomenda e Custos

Item	Quantidade	Dimensões			Custo Unitário [€]
		Diâmetro [*mm*]		Comprimento [*mm*]	
		Interno	Externo		
Tubo	1	125	150	195	€187,10
Varão	1	-	220	160	€610,70
Corte					€19,15
IVA					€171,56
Custo Total					**€988,51**

Empresa:

Pinhol Gomes & Gomes, Lda.

Morada:

Caminho dos Confeiteiros, n.º 41

Portela de Carnaxide

2794-054 Carnaxide

Portugal

Telefone:

+351214256800

Fax:

+351214256847

A.2.2. Macor® e Superwool 607

Encomenda e Custos

Item	Quant.	Dimensões [*mm*]	Custo Unitário [€]
Macor®	1	Diâmetro x Comprimento: 40 x 150	€100,00
Superwool 607	1	Comprimento x Largura x Espessura: 2000 x 500 x 2	€48,80
Portes de Envio + IVA			€49,25
Custo Total			**€198,05**

Empresa:

RS Components

Morada:

Amidata, S.A.

Avenida da Europa, 19

28224 – Pozuelo de Alarcón

Madrid

Espanha

Telefone:

800102037

Fax:

800102038

A.2.3. Parafusos

Encomenda e Custos

Item	Quant.	Propriedades		Custo Unitário [€]
		Dimensões [Métricas]	Classe	
Parafuso Aço	24	M12x1.75 (70*mm*)	12.9	-
Parafuso Aço Inox	24		A4	-
Anilha Aço	48	M12	12.9	-
Anilha Aço Inox	48		A4	-
Porca Aço	24	M12x1.75	12.9	-
Porca Aço Inox	24		A4	-
IVA				€9,97
Custo Total				**€57,45**

Empresa:

Pecol, Sistemas de Fixação, S.A.

Morada:

Rua das Pedreiras

Restelo

1500-417 Lisboa

Portugal

Telefone:

+35121710610

Fax:

+35121782164

A.2.4. Vidro

Encomenda e Custos

Item	Quant.	Dimensões [*mm*]			Custo Unitário [€]
		Diâmetro Interior	Altura Interior	Espessura	
Copo em Pirex	1	104	170	3	€40,00
IVA					€8,40
Custo Total					**€48,40**

Entidade:

Instituto Superior Técnico

Morada:

Av. Rovisco Pais

Pavilhão Multidisciplinar

Cave

Oficina de Vidro

1049-001 Lisboa

Portugal

Telefone:

+35121841

A.2.5. Interfaces

Encomenda e Custos

Item	Quant.	Referência	Custo Unitário [€]
Macho *NPT* 1/16”	4	SS-100-1-4	€14,04
Ligação de Porta	5	SS-401-PC	€4,92
Válvula	2	SS-62XPS4	€187,06
Tê	1	SS-400-3-4TFT	€28,49
Válvula de Segurança	1	SS-4R3A	€128,63
Mola para Válvula	1	177-R3A-K1-D	€3,48
Manómetro de Pressão	1	PGI-63B-BG250-LAQX	€44,09
Manómetro de Temperatura*	1	-	€26,00
Tampão ¼”	5	SS-400-P	€4,81
Portes de Envio + IVA			€153,22
Custo Total			**€882,84**

* - este manómetro é costumizado e foi produzido pela F. Louro – Equipamento e Instrumentos para Máquinas.

Empresa:

StecInstruments – Sistemas Técnicos, Equipamentos e Consumíveis, Lda. (Swagelok)

Morada:

CiDEB

Edifício da Escola Superior de Biotecnologia

Rua Dr. António Bernardino de Almeida

4200-072 Porto

Portugal

Telefone:

+351225504077

Fax:

+351225504086

A.2.6. Extensometria

Encomenda e Custos

Item	Quant.	Referência	Custo Unitário [€]
Extensómetro Roseta	1	1-RC11-4/350	€173,85
Adesivo de dois Componentes	1	EP310S	€114,00
Agente de Protecção	1	SG250	€48,45
Dispensa de Limpeza	1	RSP120	€45,60
Pads de Limpeza	1	8402.0026	€18,05
Terminais de Soldadura	1	LS7	€48,45
Custo Total			**€448,40**

Empresa:

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH - HBM

Morada:

Im Tiefen Sie, 45

D-64293 Darmstadt

Alemanha

Telefone:

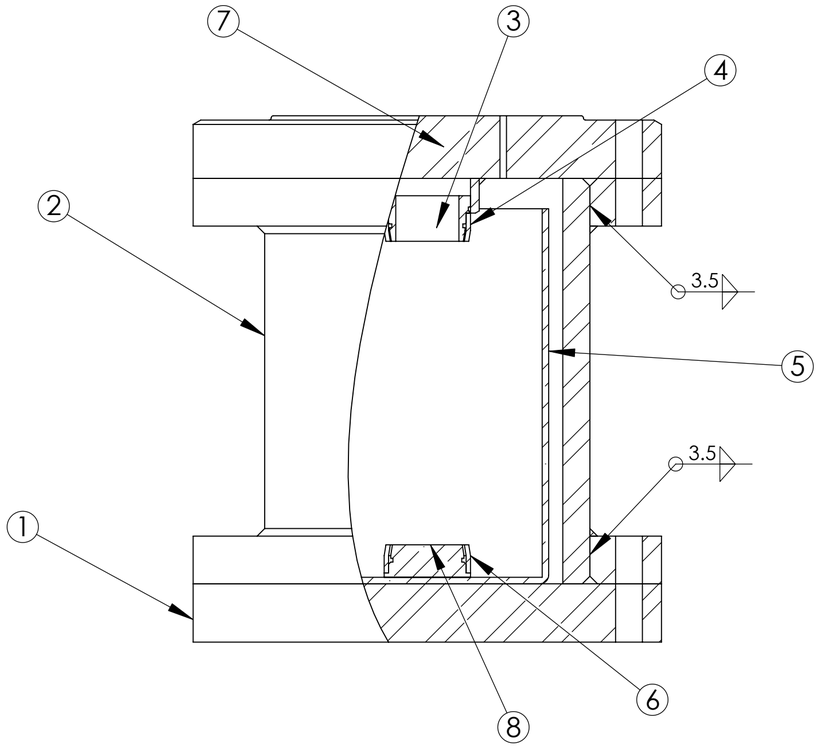
+49 06151/803-0

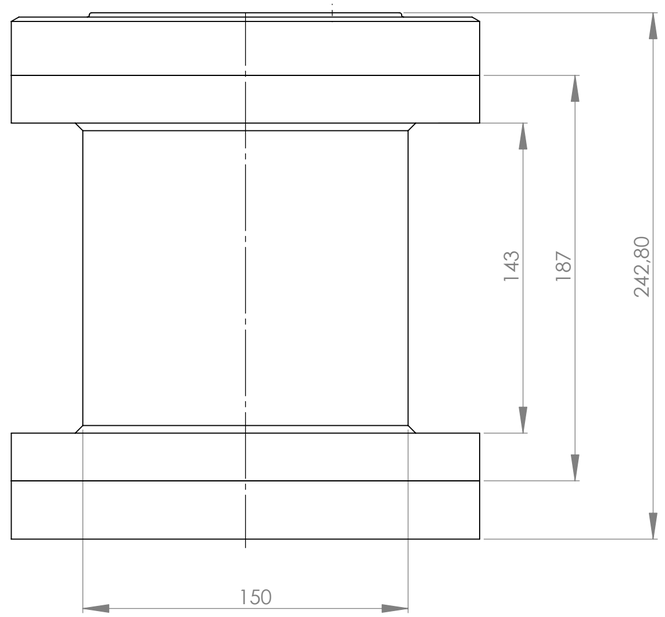
Fax:

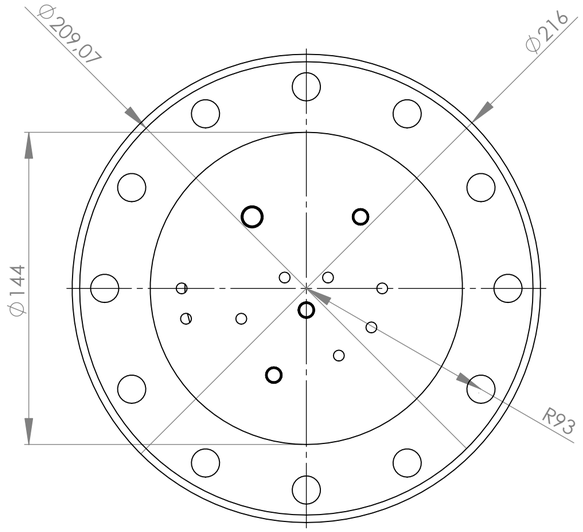
+49 06151/894896

B. PRODUÇÃO

B.1. Desenhos Técnicos

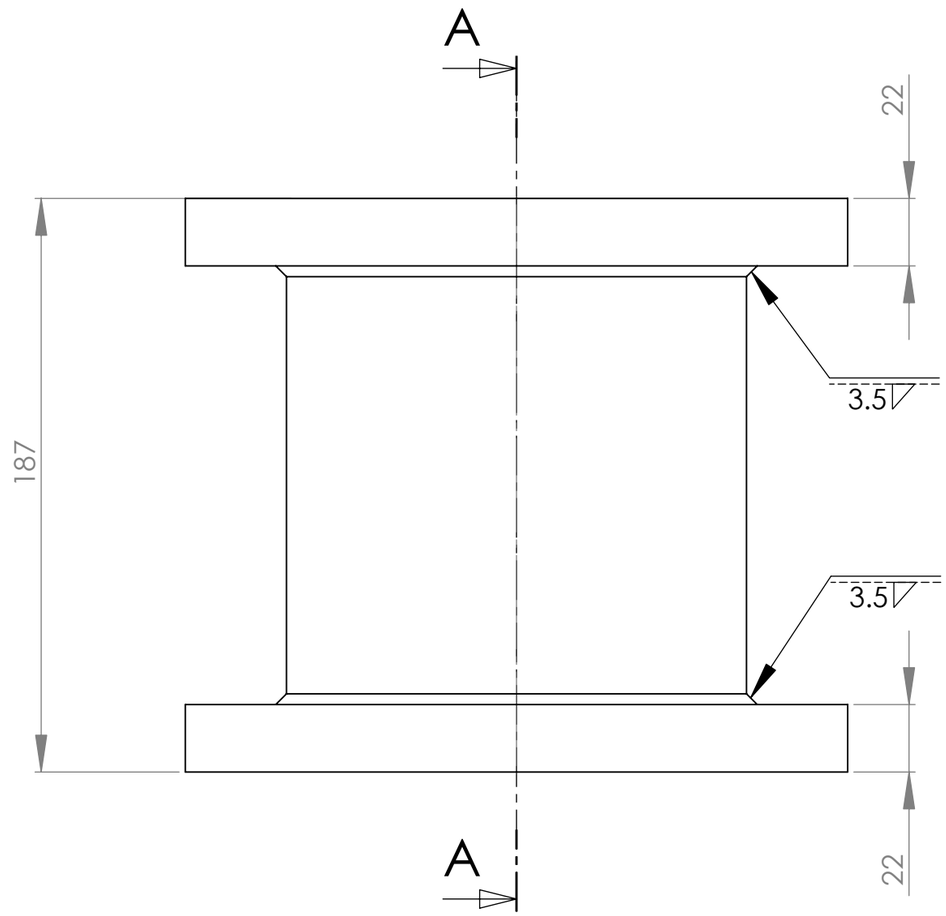


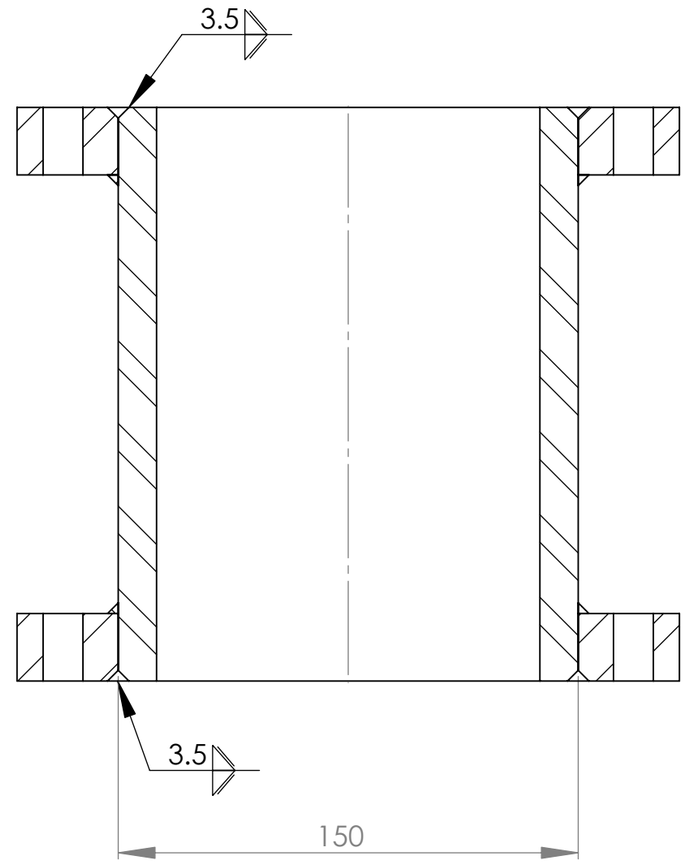


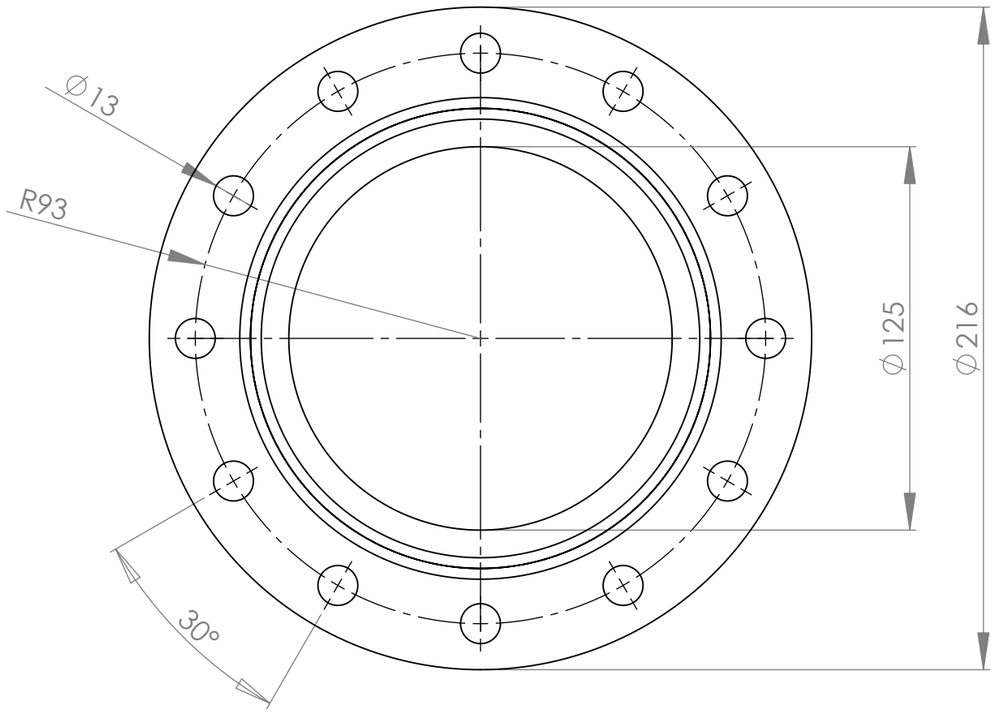


Nº	DESIGNAÇÃO	NORMA OU DESENHO Nº	MATERIAL	REF.	Nº Molde	PESO	OBS.
1	Tampa Inferior	RCTR-002	Aço AISI 316L			7.5 kg	
2	Estrutura Cilíndrica	RCTR-001	Aço AISI 316L			14.15 kg	
3	Suporte Superior Macho	RCTR-006	Macor			0.018 kg	
4	Suporte Superior Fêmea	RCTR-007	Macor			0.007 kg	
5	Vidro	RCTR-004	Sílica			0.5 kg	
6	Suporte Inferior Fêmea	RCTR-007	Macor			0.007 kg	
7	Tampa Superior	RCTR-003	Aço AISI 316L			7.8 kg	
8	Suporte Inferior Macho	RCTR-005	Macor			0.035 kg	

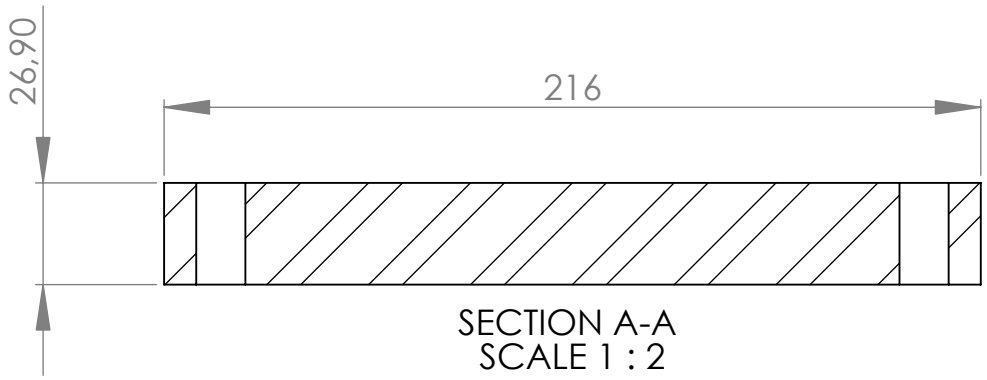
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: none				DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING / REVISION
							Omnidea, Lda.
	NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE: Reactor
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07				
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07				
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07				
MFG							
Q.A				MATERIAL:			DWG NO. RCTR-000 / A2
				WEIGHT: 30 kg			SCALE: 1:2 / SHEET 1 OF 1



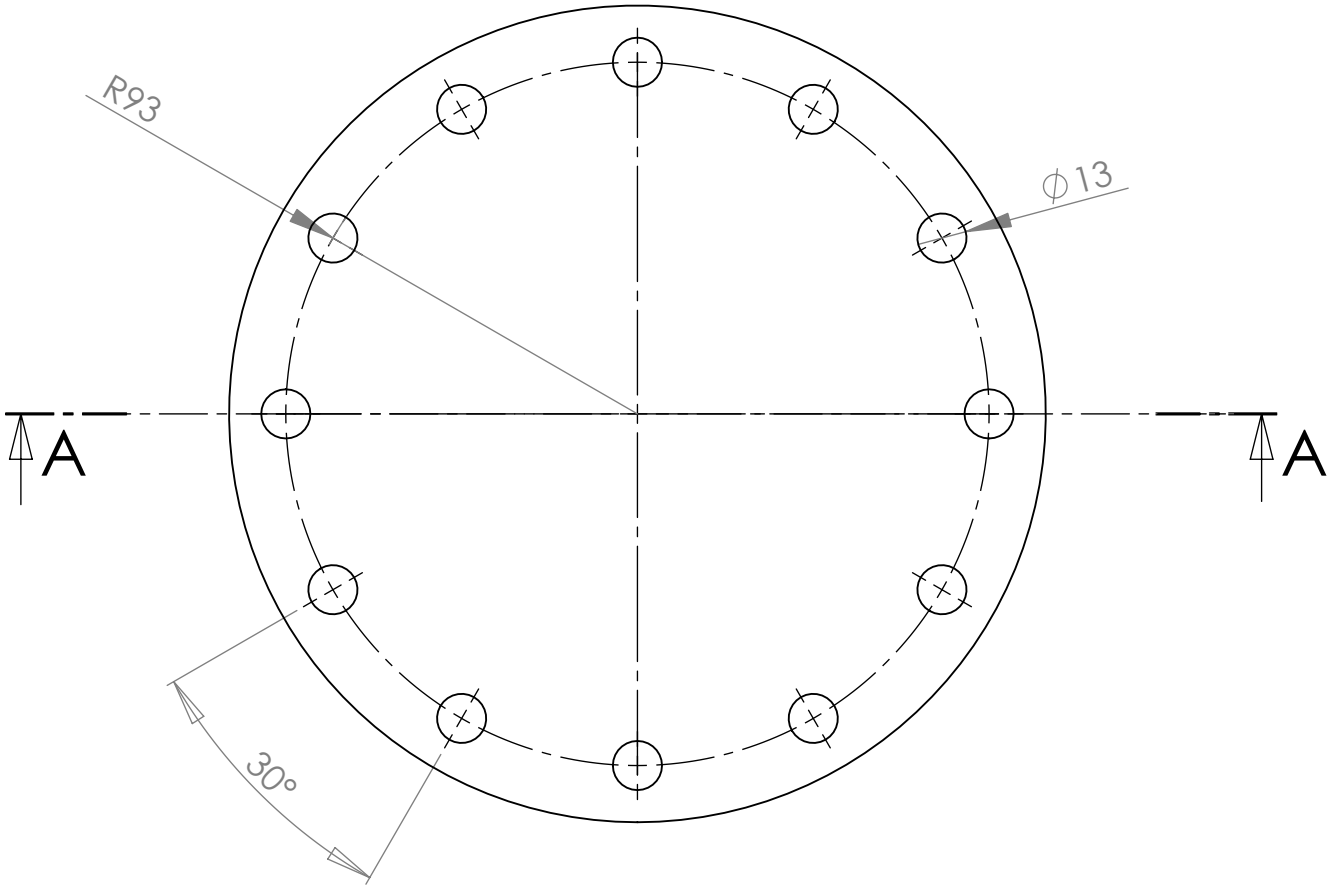




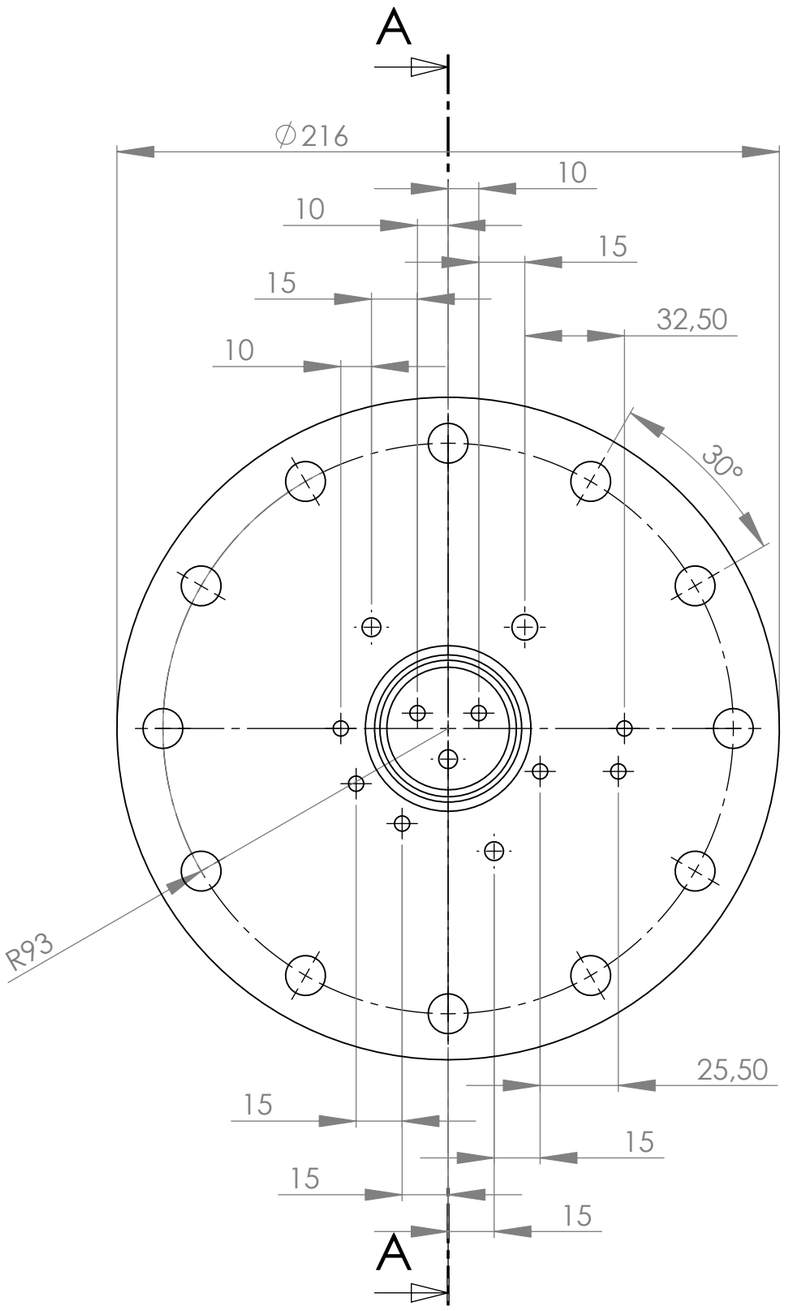
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.04mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.5mm ANGULAR: +/- 0.3°		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
						Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: Estrutura Cilíndrica	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07				
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07				
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07				
MFG							
Q.A				MATERIAL: Aço AISI 316L		DWG NO. RCTR-001	A3
				WEIGHT: 14.15 kg		SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1

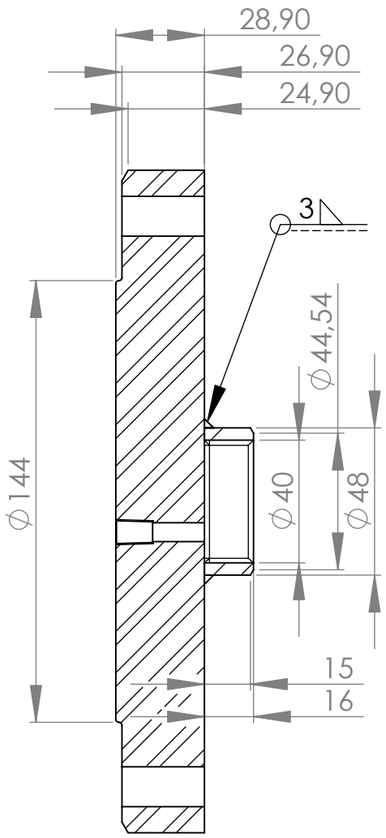


SECTION A-A
SCALE 1 : 2

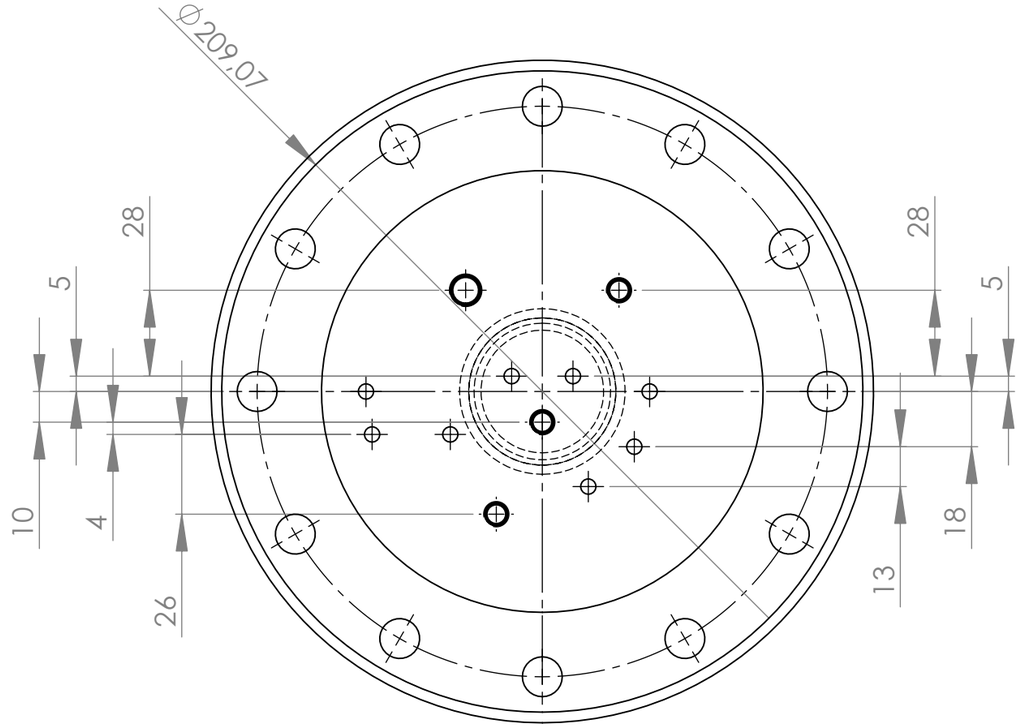


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.04mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.5mm ANGULAR: +/- 0.3°		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
					Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Tampa Inferior	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07			
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07			
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07			
MFG						
Q.A				MATERIAL: Aço AISI 316L	DWG NO. RCTR-002	A4
				WEIGHT: 7.5 kg	SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1

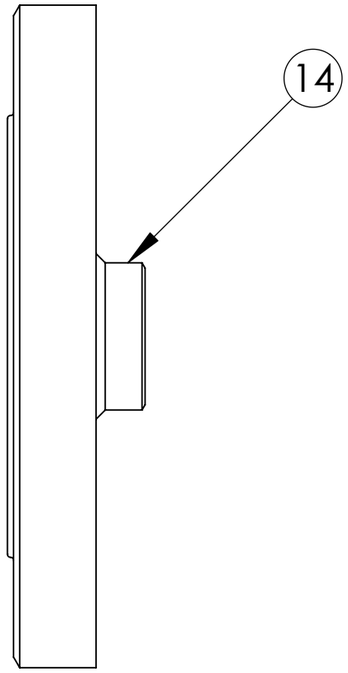




SECTION A-A
SCALE 1 : 2



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.04mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.5mm ANGULAR: +/- 0.3°		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
						Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: Tampa Superior	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07				
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07				
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07				
MFG							
Q.A				MATERIAL: Aço AISI 316L		DWG NO. RCTR-003	A3
				WEIGHT: 7.8 kg		SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 2



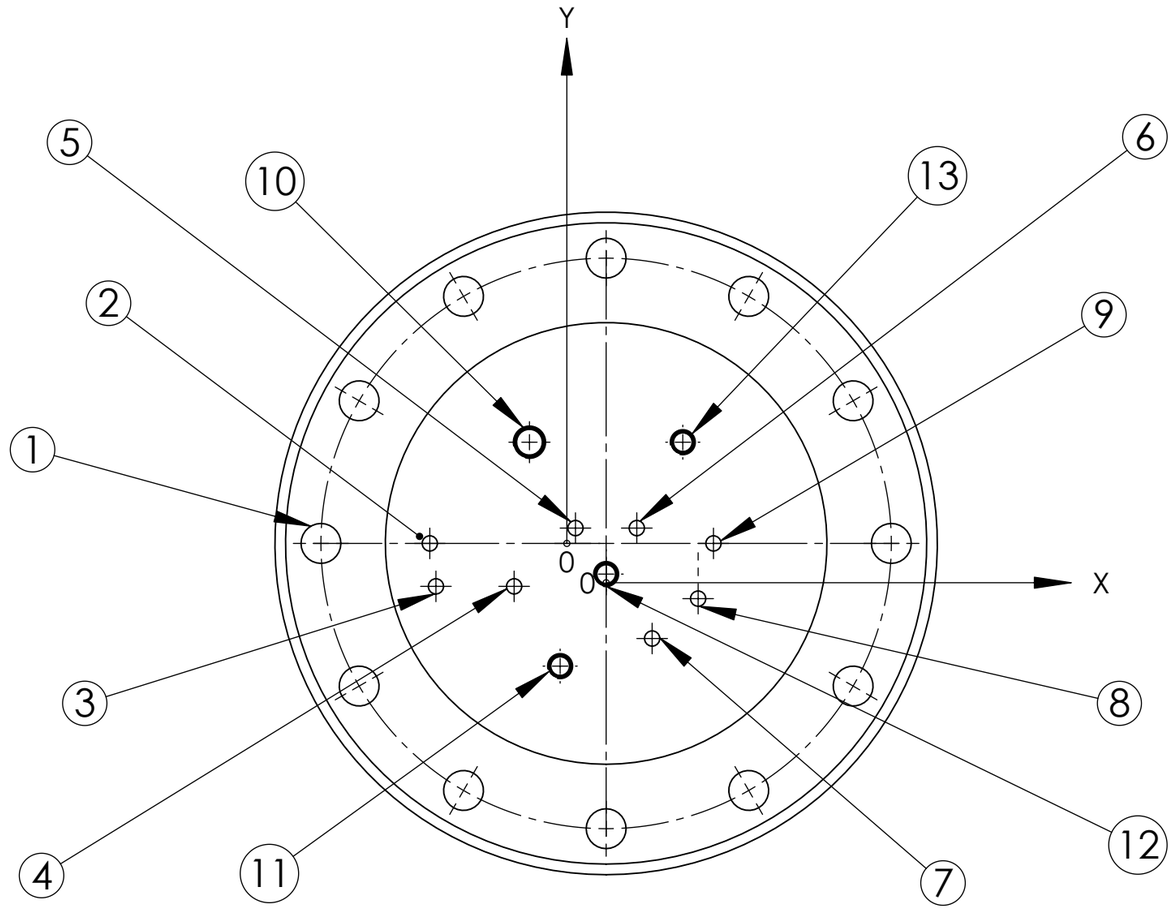


Tabela de Furos			
TAG	X LOC	Y LOC	SIZE
1	-93	0	∅13mm
2	-57.50	0	∅ 5mm THRU ALL
3	-55.50	-14	
4	-30	-14	
5	-10	5	
6	10	5	
7	15	-31	
8	30	-18	
9	35	0	
10	-25	33	∅ 8.43mm THRU ALL 1/8 NPT ⌵ ∅ 10.16mm X 45°, Near Side
11	-15	-40	∅ 6.15mm THRU ALL 1/16 NPT ⌵ ∅ 7.62mm X 45°, Near Side
12	0	-10	
13	25	33	
14	0	0	M40x1.0 (16mm length)

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH: 0.04mm
TOLERANCES:
LINEAR: +/- 0.5mm
ANGULAR: +/- 0.3°

FINISH: none

DEBUR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Omnidea, Lda.

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07
MFG			
Q.A			

TITLE:

Tampa Superior

MATERIAL: Aço AISI 316L

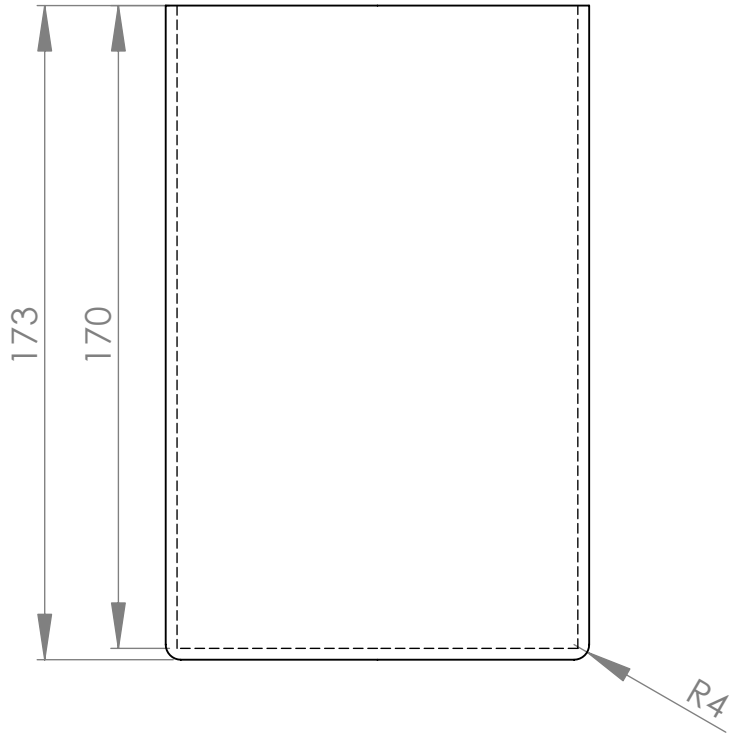
WEIGHT: 7.8 kg

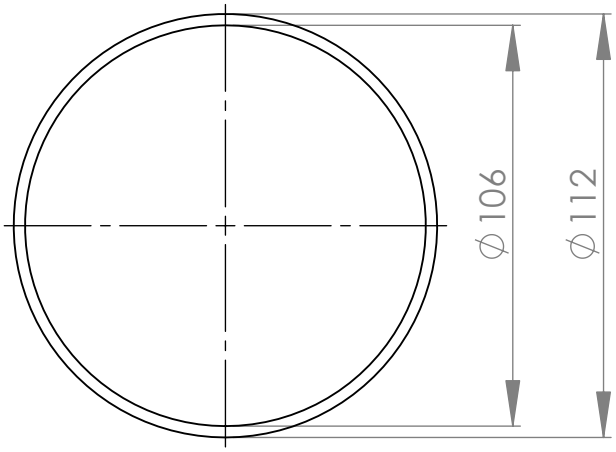
DWG NO. RCTR-003

A3

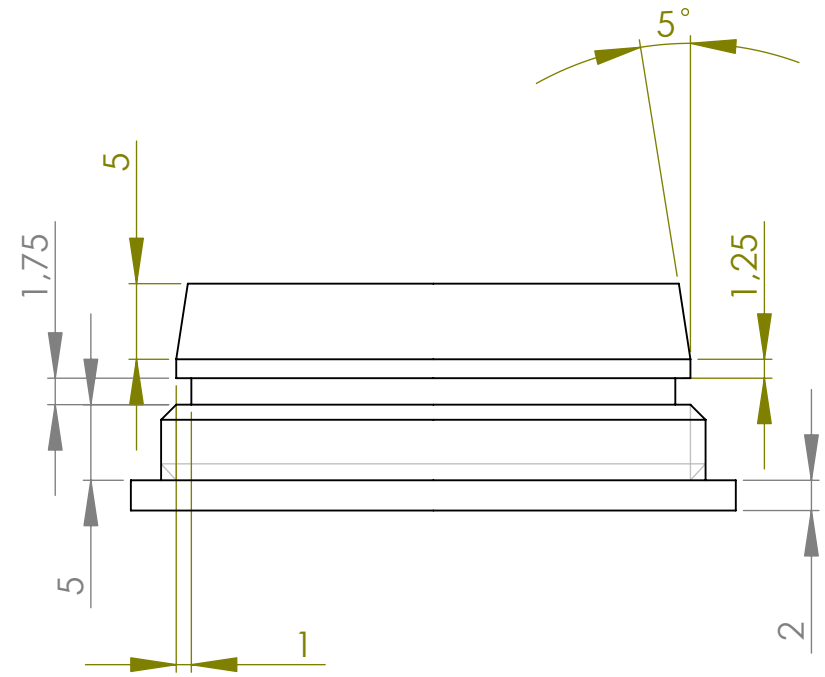
SCALE: 1:2

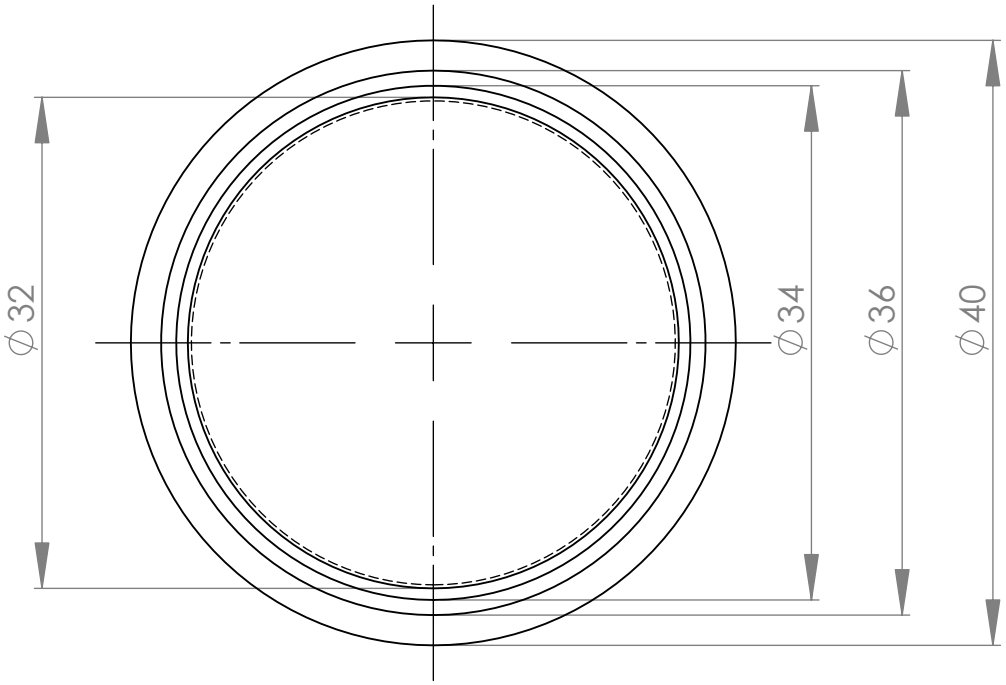
SHEET 2 OF 2



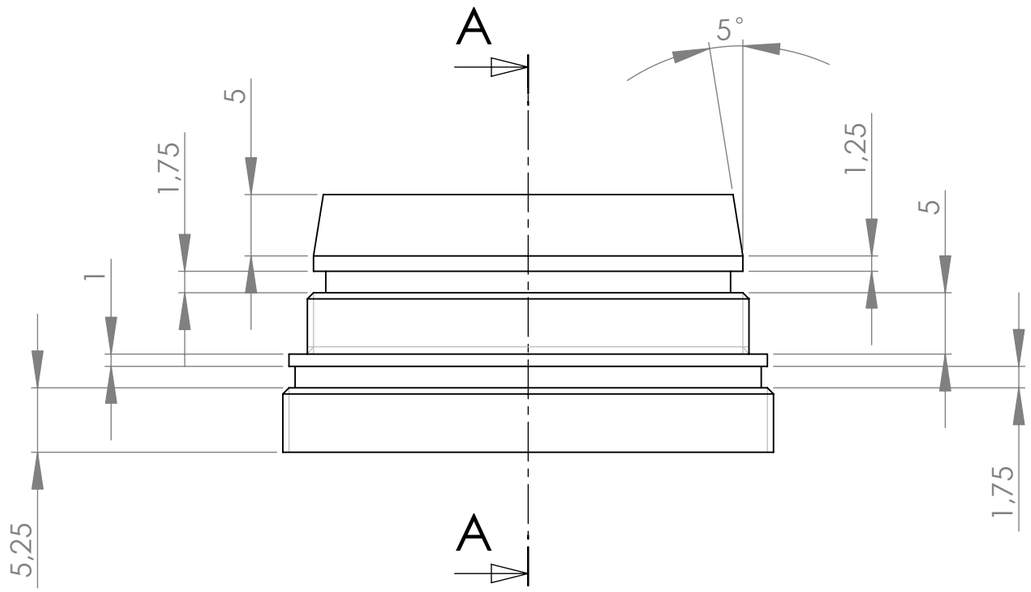


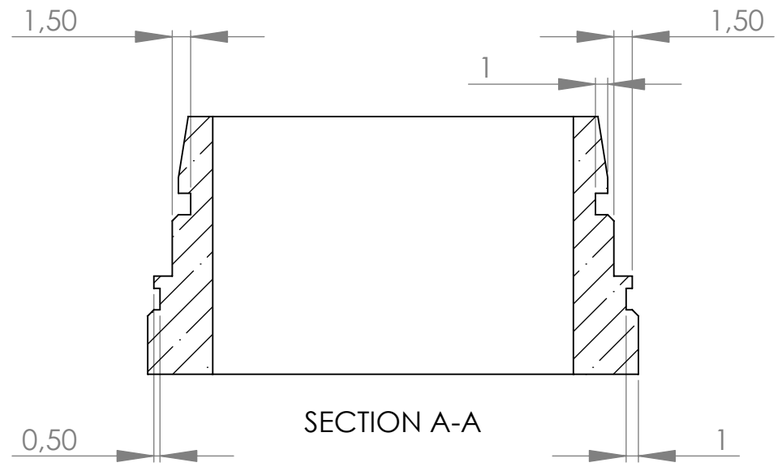
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.1mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.5mm ANGULAR:		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
					Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Copo de Vidro	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07			
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07			
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07			
MFG						
Q.A				MATERIAL: Sílica	DWG NO. RCTR-004	A4
				WEIGHT: 0.5 kg	SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1



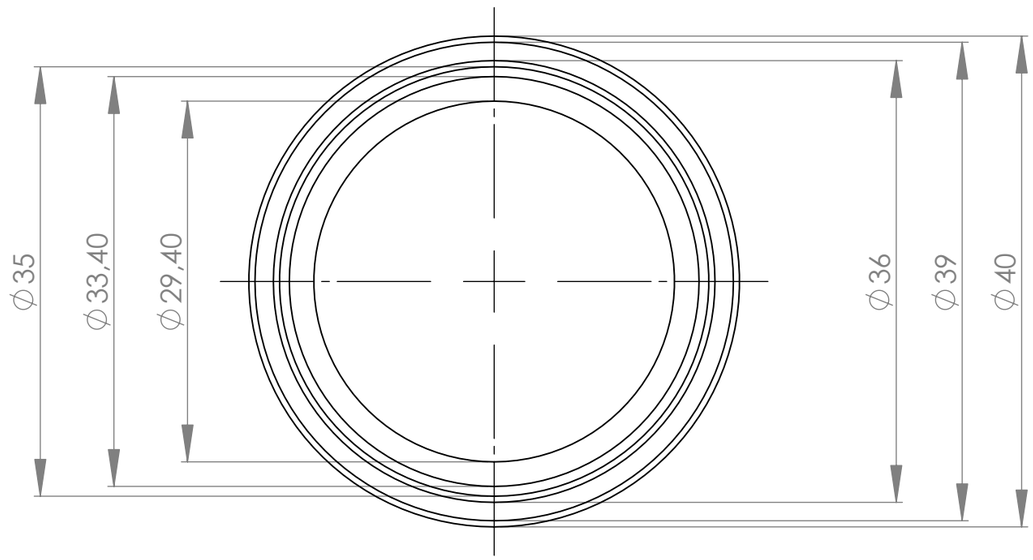


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.08mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.1mm ANGULAR: +/- 0.1°		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
					Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Suporte Inferior Macho	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07			
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07			
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07			
MFG						
Q.A				MATERIAL: Macor	DWG NO. RCTR-005	A4
				WEIGHT: 0.035 kg	SCALE: 2:1	SHEET 1 OF 1

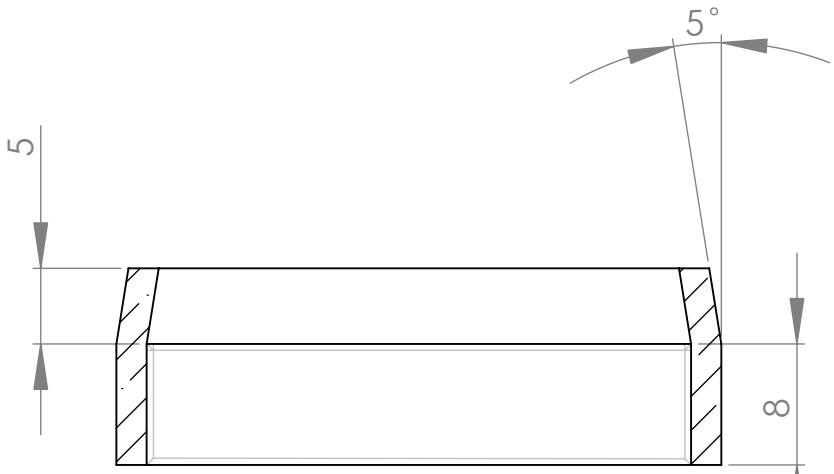




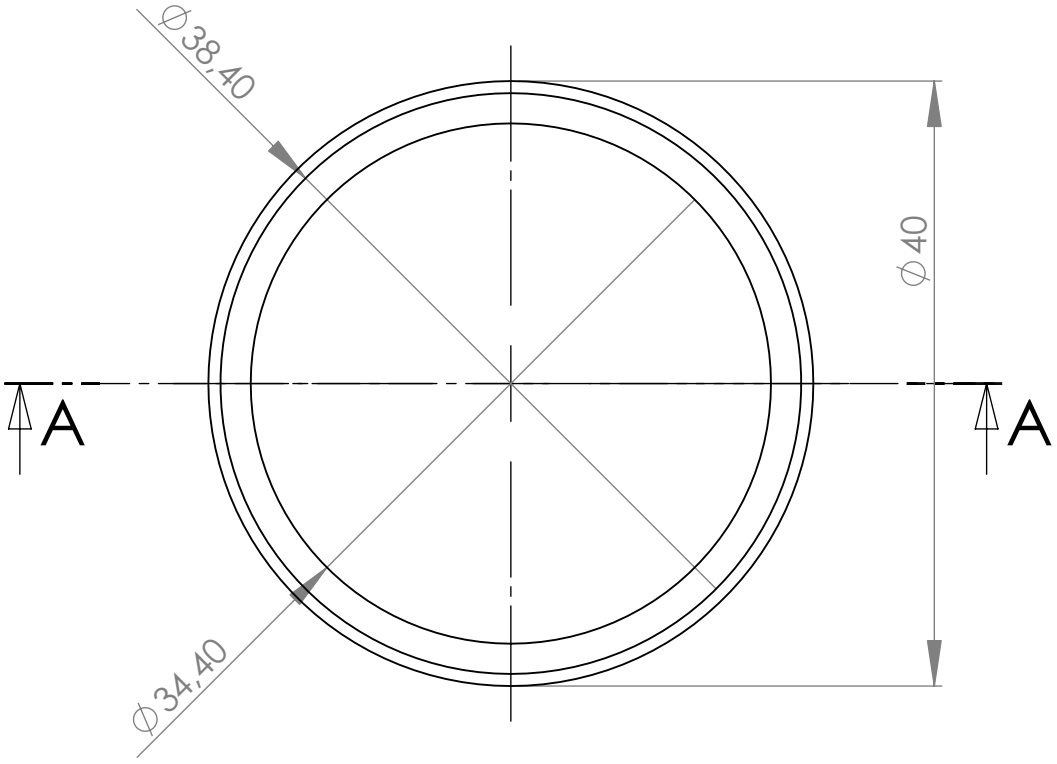
SECTION A-A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.08mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.1mm ANGULAR: +/- 0.1°		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
						Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: Suporte Superior Macho	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07				
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07				
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07				
MFG							
Q.A				MATERIAL: Macor		DWG NO. RCTR-006	A3
				WEIGHT: 0.018 kg		SCALE: 2:1	SHEET 1 OF 1



SECTION A-A
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: 0.08mm TOLERANCES: LINEAR: +/- 0.1mm ANGULAR: +/- 0.1°		FINISH: none		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
					Omnidea, Lda.	
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	Daniel Mendes		30.08.07		Suporte Fêmea	
CHK'D	Daniel Mendes		31.08.07			
APPV'D	Daniel Mendes		31.08.07			
MFG						
Q.A				MATERIAL: Macor	DWG NO. RCTR-007	A4
				WEIGHT: 0.007 kg	SCALE: 2:1	SHEET 1 OF 1

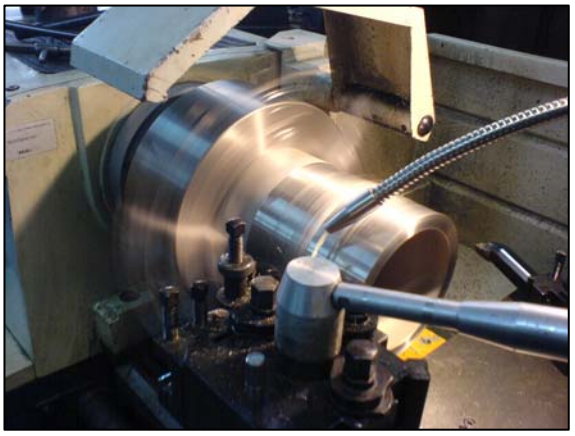
B.2. Processo de Produção

Todo o processo de fabrico, excepto quando especificado, foi efectuado no Laboratório de Técnicas Oficinais (LTO), no Pavilhão de Mecânica II, do Instituto Superior Técnico (Universidade Técnica de Lisboa), sob a supervisão dos técnicos Sr. Pedro Teixeira e Sr. Nelson Fernandes, do responsável Eng. Luís Reis e do orientador do projecto Professor António Relógio Ribeiro.

O primeiro passo a tomar foi recorrer ao fornecimento de material para a construção da estrutura externa do reactor. Para tal, recorreu-se ao fornecedor Pinhol Gomes e Gomes, onde foi adquirida a seguinte matéria-prima: varão em aço inoxidável 316L com 220*mm* de diâmetro e 160*mm* de comprimento e tubo no mesmo material com 125*mm* de diâmetro interno e 150*mm* de diâmetro externo.

A partir daqui, foi introduzido o varão numa serra circular *Optimum Quantum* com lubrificação através de uma mistura de água e óleo, com o intuito de ser cortado transversalmente, de forma a obter quatro peças com as seguintes espessuras: uma peça de 33*mm*, uma peça de 31*mm* e duas peças de 27*mm*. Enquanto a primeira peça do varão (33*mm* de espessura) era cortada, operação que demorou cerca de 12 horas a concretizar, foi efectuado o torneamento aos topos do tubo, onde foi desbastado o excesso de comprimento do mesmo, relativamente ao comprimento final pretendido, deixando-se apenas 2*mm* de material em excesso para futuras operações. Esta operação foi efectuada num torno *Optimum Quantum* de controlo numérico e levou cerca de 3 horas e meia a concretizar.

Seguidamente, foi efectuado o desbaste e acabamento das faces exterior e interior do tubo de aço inoxidável. Esta operação foi executada de forma faseada, visto que, por questões económicas, o tubo não tinha comprimento suficiente para ser torneado numa só operação ao longo de todo o seu comprimento. Desta forma e visto que o tubo, para além de uma camada protectora interior e exterior,

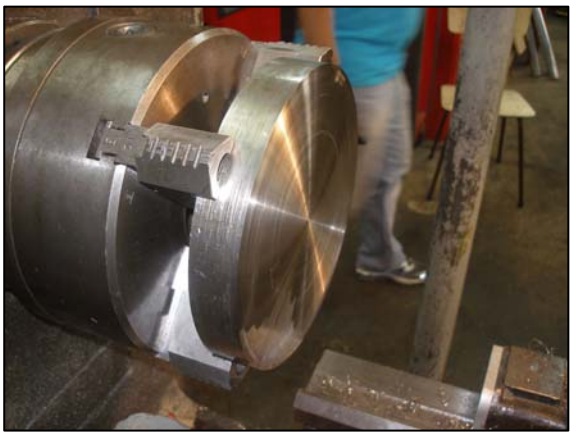


trazia uma sobrespessura de cerca de 1.5*mm*, foi primeiro efectuado o desbaste e acabamento de parte do diâmetro externo, depois tubo foi virado no torno e posteriormente efectuado o desbaste e acabamento do restante do diâmetro externo.

Da mesma forma, o desbaste e acabamento do diâmetro interno foram também efectuados de forma faseada: primeiro executado o desbaste e acabamento de metade do diâmetro interno, seguidamente o tubo foi virado no torno e, por fim, efectuado o desbaste e acabamento do restante diâmetro interno. Após estas operações, foram feitas algumas passagens com lixa de água juntamente com água, por forma a melhorar um pouco o acabamento e o aspecto visual do tubo.

Por fim, foi efectuado o chanfro exterior em cada um dos topos do tubo que iria acomodar futuramente a soldadura que liga o tubo às abas laterais do reactor. Esses chanfros foram concretizados com um ângulo de 45º e 3.5*mm* de profundidade, relativamente à face do topo do tubo. Todas as operações de torneamento do tubo demoraram cerca de 18 horas a concretizar.

Entretanto, deu-se a finalização do corte, por parte da serra circular, da primeira peça (33*mm* de espessura) retirada do varão de 220*mm* de diâmetro. Após este primeiro corte foi de imediato preparado o corte da segunda peça (27*mm* de espessura), tendo sido então verificado um ponto que poderia trazer alguns problemas nos cortes futuros. Este problema prendia-se com o facto de o varão ter, por um lado, um diâmetro demasiado grande para as abas que o sustentavam e, por outro lado, um comprimento demasiado pequeno para que essas mesmas abas o conseguissem segurar de uma forma correcta. Assim, foi necessário recorrer a uma barra de aço de cerca de 220*mm* de comprimento, de forma a nivelar as abas de aperto e conferir uma melhor sustentação do varão. No entanto, durante o corte dessa segunda peça, a lâmina da serra circular sofreu uma rotura e uma fractura que obrigou à cessação do corte, à encomenda de novas lâminas para substituir a lâmina danificada e, consequentemente, interromper o corte do varão durante 3 dias.



Com a primeira peça do varão cortada, foi então altura de efectuar o seu torneamento, por forma a desbastá-la em espessura até à espessura final e deixar uma pequena sobrespessura radial de forma

a posteriormente efectuar o acabamento nesta zona. Após o desbaste da espessura, a peça foi torneada em espessura de forma a dar forma à sobrespessura necessária na parte central exterior da tampa superior do reactor. Esta operação levou cerca de 5 horas e meia a efectuar.

À chegada das novas lâminas para a serra circular, uma delas foi de imediato colocada na máquina e foi dada continuação ao corte da primeira peça de 27*mm* de espessura, no entanto, para além do corte não estar a demonstrar desenvolvimentos, deparou-se com o problema da evolução do mesmo estar-se a dar com uma inclinação inesperada e indesejável. Para resolver estas situações, foi adicionado um peso extra de forma a ajudar a serra a evoluir no corte e decidiu-se que este seria feito em três fases, por forma a tentar corrigir a indesejada inclinação do corte. Contudo, na terceira fase do corte, a segunda lâmina da serra circular sofreu novamente uma fractura, o que obrigou a recorrer aos serviços da Pinhol Gomes e Gomes e efectuar os restantes cortes nas suas instalações. Os cortes das restantes três peças demoraram cerca de 1 hora e 45 minutos a concretizar.

A partir daqui foi então possível proceder ao início da desassemblagem da parte interna das abas, relativamente às mesmas. Essa desassemblagem foi efectuada através de uma furacão consecutiva, com o auxílio do engenho de furar, de uma broca de ponto e de brocas de 8*mm* e 10.5*mm* de cobalto (mais indicadas para maquinar aço inoxidável) de forma a criar um "picotado" à volta do perímetro de material a retirar. Uma alternativa a este método, seria furar as peças no torno, progressivamente, até atingir a maior broca disponível na oficina e então desbastar o excesso de material com recurso a um ferro interior. Contudo, este método foi rejeitado, devido ao facto de que, com o método utilizado, ser possível aproveitar uma quantidade muito considerável de material, ao contrário do que aconteceria com o método rejeitado, onde todo o material em excesso seria desperdiçado. Após a furação, as membranas que separavam os furos

foram fragilizados, com o auxílio de um martelo e de um punção, até que se desse a separação das duas partes da peça.

Seguidamente à separação das duas partes da peça, no caso das duas peças com 27*mm* de espessura, foi então efectuado o torneamento do interior das abas, com recurso a um ferro e respectiva pastilha de interior. Esse desbaste, foi executado até que todos os sulcos desaparecessem e, consequentemente, que fosse atingido o diâmetro interior pretendido. Após ser atingida a medida almejada para o diâmetro interior das abas, foi efectuado o chanfro requerido para concretizar posteriormente a soldadura entre estas peças e o cilindro anteriormente maquinado. Esse chanfro tem exactamente a mesma forma e dimensões daqueles feitos no cilindro, para que a soldadura nessa zona seja uma soldadura de canto (90º) com uma garganta de 4*mm*.

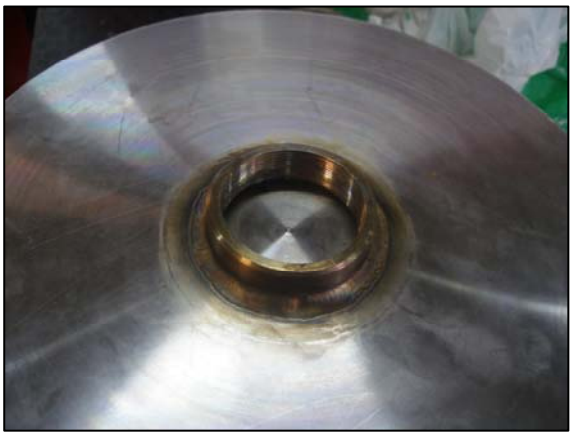
O processo de furação demorou cerca de 25 horas a concretizar e o torneamento de desbaste e acabamento das abas demorou cerca de 20 horas de maquinagem a concretizar.

Por fim, foi então torneada a última peça (de 31*mm* de espessura) que dá origem à tampa inferior do reactor, em que foi simplesmente feito o facejamento transversal da mesma até atingir uma espessura igual à espessura final pretendida (26.9*mm*) e o desbaste radial até atingir um diâmetro ligeiramente maior ao pretendido, por forma a permitir posteriormente efectuar o acabamento final. Este desbaste radial foi executado de forma faseada, onde foi maquinada metade da espessura em cada uma das fases. A maquinagem desta última peça, levou cerca de 2 horas a concretizar.

De forma a optimizar o tempo de produção do reactor e de organizar o processo de maquinagem em prol de operações seguintes a efectuar externamente, nomeadamente as soldaduras necessárias à construção do reactor, em seguida foi preparada a peça que irá sustentar as peças roscadas em *Macor*, que por sua vez irão dar origem à câmara interna do reactor. Essa peça, trata-se um anel roscado, constituído também por aço inoxidável 316L e fabricado a partir de um pequeno varão de 50*mm* de diâmetro e de 60*mm* de comprimento. O processo de fabrico deste anel passou primeiro pelo torneamento do diâmetro externo, até ser atingido o diâmetro final, após o qual foi furado

também no torno, com recurso a uma broca de ponto, a brocas de cobalto de 4*mm*, 7*mm* e 10*mm* e a brocas HSS de 15*mm*, 22*mm* e 32*mm*, tendo sido utilizadas de forma sucessiva até ser atingido um diâmetro confortável para utilizar então o ferro e pastilha de corte interior. Com esta ferramenta, o anel foi torneado de forma a atingir o diâmetro interno pretendido (39*mm*), após o qual foi utilizado um ferro específico para abrir roscas métricas interiores, com o qual foi feita uma rosca direita com diâmetro de crista de 39*mm*, diâmetro de raiz de 40*mm* e passo de 1.0*mm*. Após a abertura da rosca, foi executado um pequeno chanfro (para efeitos de soldadura), e o anel foi sangrado ao comprimento próximo do pretendido (20*mm*), o qual foi posteriormente virado e feito o acabamento da face sangrada. A produção deste anel roscado demorou cerca de 6 horas a efectuar.

Seguidamente, as abas, a peça cilíndrica, a tampa superior e o anel roscado foram transportados até uma empresa especializada de soldadura, onde foram soldadas as abas ao cilindro e o anel roscado ao centro do interior da tampa superior. O processo de soldadura incluiu uma passagem em todos os perímetros a soldar pelo processo de soldadura TIG (Tungsten Inhert Gas) com o objectivo de unir preliminarmente as peças em causa e principalmente constituir o isolamento mecânico destas uniões. Após essa primeira passagem, foram efectuadas mais duas passagens de enchimento, através do processo de soldadura por Eléctrodo Revestido, com o intuito de consumar a restante soldadura e de fazer o enchimento dos chanfros, por forma a obter uma garganta de soldadura idêntica àquela que foi projectada (garganta com 4*mm* de comprimento). Foram utilizados eléctrodos *Eurotrod LC 28*, específicos para soldadura de várias gamas de aço inoxidável, entre elas, a gama de aço inoxidável 316L. É de notar que, no caso da soldadura entre a o anel roscado e a tampa superior não carece de qualquer tipo de projecto, dado que a mesma não irá suportar esforços relevantes, devido ao equilíbrio de pressão a ter entre as câmaras interna e externa do reactor. Apenas foi necessário a estanquecidade entre as duas câmaras, que a soldadura também deverá garantir. Os serviços prestados pela empresa de soldadura, demoraram cerca de 3 dias a concretizar (sem limpeza nem acabamento).



Levantadas as peças na empresa de soldadura, foi então altura de fazer o tratamento, limpeza e acabamentos das superfícies soldadas e circundantes, bem como da espessura das abas, agora soldadas à peça cilíndrica. O acabamento das abas foi efectuado com recurso ao torno mecânico, onde foram facejados os topos da peça, por forma a garantir um bom acabamento dessas faces (essencial para garantir a estanquecidade do reactor, quando as abas estiverem ligadas às tampas inferior e superior, por via de parafusos) e a obter a espessura projectada para as abas e o comprimento pretendido para a parte cilíndrica. É de notar que, com a peça presa no torno e em rotação, verificou-se um certo empeno na peça, que provavelmente se deve à assemblagem das peças na soldadura e ao aquecimento que as peças sofreram durante esse mesmo processo de soldadura. Depois de terminado este acabamento, foi dada alguma atenção aos pingos, escória e manchas consequentes do processo de soldadura, existentes no cilindro e na tampa superior. Para tal, recorreu-se também ao torno para passar, sequencialmente, nas superfícies descritas, lima fina, seguido de lixa e, por fim, lixa de água com mistura de água e óleo. Estas operações levaram cerca de 8 horas a concluir.

Seguidamente, foi iniciado o processo da furação dos quatro componentes principais, que dará origem às ligações aparafusadas entre eles. Para tal, recorreu-se a um prato divisor e a uma fresa de controlo numérico *Quantum* existente no LTO. Em primeiro lugar, acoplou-se o prato divisor à mesa da fresa com a ajuda de apoios, sendo que a primeira peça a furar (tampa inferior do vaso de pressão) foi posteriormente assente no prato divisor e calibrada a sua centragem através da utilização de um comparador. Após garantir a centragem entre a tampa inferior e o prato divisor, o primeiro foi acoplado ao segundo, através de um método de recurso, dado que o tamanho da bucha do prato divisor era demasiado pequeno para suportar a tampa inferior do reactor. Para tal, utilizaram-se dois parafusos de fixação presos nas calhas do prato divisor separadas por 180º, uma barra de ferro que atravessava toda a tampa inferior e possuía dois furos que encaixavam nos parafusos, e duas porcas que, ao enroscar nos parafusos, apertavam então a barra de ferro contra a tampa inferior do reactor e, consequentemente, esta contra o prato divisor. Em seguida, alinhou-se, com recurso à broca de ponto, o centro da cabeça da fresa ao centro do prato divisor, após o qual foi afastado 93*mm* do centro (distância entre o centro dos furos para os parafusos do reactor e o centro da tampa do reactor) e foi efectuada a identação dos pontos a serem posteriormente furados, com a broca de ponto, com um espaçamento de 30º (visto serem necessários 12 parafusos – 360º/12=30º). Esta identação foi efectuada duas vezes, de forma a verificar novamente a centragem da tampa em relação ao prato divisor e da colocação da cabeça da fresa em relação ao prato divisor. Após a identação, deu-se início à furação que foi feita primeiro com uma broca de cobalto de 7*mm* e posteriormente com uma broca de cobalto de 10*mm* e com uma profundidade de cerca de 20*mm*, ou seja, não passante de modo a não danificar o prato divisor. Depois de feita esta furação, retirou-se a

tampa do prato divisor e recorreu-se ao engenho de furar para então efectuar os furos passantes naqueles já executados. Note-se que, apesar da furação final ser feita com uma broca de 13*mm*, até agora os furos feitos têm um diâmetro máximo de 10*mm*, devido ao facto de que, se persistir algum pequeno desalinhamento entre as várias peças, existe ainda uma margem de segurança de 3*mm*, que permitirá corrigir esses possíveis desalinhamentos. A partir daqui, tem-se então preparada a furação modelo que será usada em todas as outras, de forma a que as restantes furações axissimétricas estejam em concordância umas com as outras. Assim, foi colocada a peça cilíndrica verticalmente na mesa da fresa, a tampa inferior em cima dessa e centradas uma com a outra, sendo fixas com recurso a grampos manuais e assim utilizando a tampa inferior (já furada) como guia para a furação da aba da parte cilíndrica. Essa furação foi executada directamente com a broca de cobalto de 10*mm* e, quando verificada a concordância de todos os furos das duas partes, esses furos foram alargados com uma broca de 13*mm*, dimensão esta que garante a passagem dos parafusos M12x1.75:12.9. O mesmo método foi utilizado na furação da tampa superior (em que a tampa inferior serviu de guia) e da segunda aba da parte cilíndrica (em que a tampa superior serviu de guia). No final, foi efectuada a remoção das rebarbas (escariação) em todos os furos, com recurso a uma broca de 19*mm*. Todo o processo de furação axissimétrica das peças, levou cerca de 26 horas a concretizar.

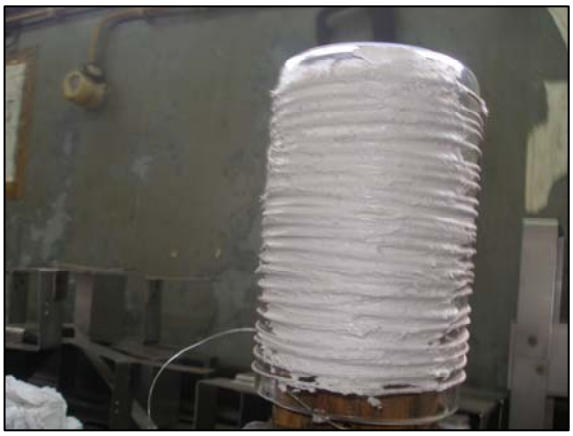
Depois de feitas todas as furações axissimétricas, foi então altura de efectuar o acabamento radial final, onde todas as peças que constituem a estrutura principal do reactor foram assembladas e ligadas através de parafusos M12x1.75*mm*. Após a sua assemblagem, as peças foram torneadas radialmente e simultaneamente, por forma a obter uma uniformização radial das mesmas e o seu acabamento. Esta operação, demorou cerca de 3 horas a efectuar.

Os pernos de contacto, que irão fornecer corrente eléctrica aos componentes interiores que exigem essa componente, foram fabricados a partir de parafusos M4x0.7*mm*, torneados em zonas específicas do seu comprimento, de forma a criar pequenas caixas de acoplamento dos o-rings necessários à vedação destes interfaces. Nomeadamente, foi feita uma caixa junto à cabeça do

parafusos (com cerca de 3.5*mm* de diâmetro, para acomodar um o-ring em Viton com 3*mm* de diâmetro interno e 2*mm* de espessura, com objectivo de vedar mecanicamente os furos passantes onde os perno ficarão acoplados), duas caixas a cerca de 8*mm* da cabeça do parafuso e a 20*mm* da cabeça do parafuso (com cerca de 3.8*mm* de diâmetro, para acomodarem o-rings em Viton com 3*mm* de diâmetro interno e 1*mm* de espessura, com o intuito de garantir que os pernos não tocam nas paredes dos furos passantes onde estes ficarão acoplados, isolando electricamente a estrutura externa do reactor). Todo o fabrico dos pernos e respectivos testes, para garantir o sucesso deste conceito, levaram cerca de 6 horas a efectuar.

O passo seguinte passou pela furação e preparação de todos os interfaces na tampa superior do reactor. Contudo, apenas alguns foram executados preliminarmente, os essenciais para poderem ser efectuados os ensaios laboratoriais. Assim, em primeiro lugar foram preparados dois pernos de alimentação eléctrica (dedicados ao sistema de aquecimento do reactor), uma rosca NPT de 1/8" (para assemblar o termopar produzido pela empresa F. Louro – Instrumentação Industrial) e duas roscas NPT de 1/16" (uma para assemblar uma válvula de entrada e saída de gás e outra para assemblar o barómetro e a válvula de segurança). Para tal, foram primeiro marcadas as localizações de cada um dos furos, com recurso a uma broca de ponto e, posteriormente, foram feitas as respectivas furações através de brocas de cobalto e utilizando uma fresadora de controlo numérico, por forma a conseguir uma maior precisão a nível da furação em si e a nível da localização dos furos. Para assemblar os pernos de contacto eléctrico, foram feitos furos com 5*mm* de diâmetro, para a rosca NTP de 1/8" foram utilizados machos HSS NPT de 1/8" e para as roscas NPT de 1/16", foram utilizados machos NPT HSS de 1/16". Após terem sido efectuados os ensaios laboratoriais, foi então altura de executar os restantes furos para os interfaces necessários ao funcionamento requerido do reactor. Tal incluiu, 6 furos de 5*mm* para assemblar os pernos conectores de corrente eléctrica, correspondentes aos 5 eléctrodos e ao medidor de nível de pH, bem como uma rosca NPT de 1/16" para assemblar a segunda válvula de entrada e saída de gás. Todas estas operações levaram cerca de 12 horas a concretizar.

Em seguida, foi altura de efectuar a preparação e assemblagem da resistência de aquecimento ao vidro que vai servir de base para a câmara externa do reactor. Vidro este, de alto teor de sílica, que foi produzido nas instalações do Instituto Superior Técnico (Pavilhão Multidisciplinar), pelo Sr. José Luís (vidreiro), tendo levado 3 dias a fornecer a peça pretendida. A resistência do sistema de aquecimento consiste num fio de tungsténio de 2*mm* de diâmetro e cerca de 8 metros de comprimento (o que permite obter uma margem confortável para atingir os 700ºC) e isolada electricamente, através de uma manga isoladora. A sua preparação passou pela bobinagem da mesma, através da utilização de um tubo de secção circular acoplado ao torno mecânico, onde este foi mantido a uma muito baixa velocidade de rotação, de forma a permitir fazer a bobinagem da resistência, à volta do tubo. Seguidamente, a resistência foi retirada da matriz tubular e assemblado manual e tão uniformemente quanto possível, à volta do copo de vidro. Por fim, o copo foi fixo e foi aplicada uma massa refractária branca (com um limite de temperatura de cerca de 1500ºC) à volta do copo de vidro e, consequentemente, da resistência eléctrica. Esta massa refractária tem duas funções principais: fixar a própria resistência de aquecimento ao copo e concentrar o calor produzido pela própria resistência dentro do copo, nomeadamente, dentro das câmaras do reactor. Para além disso, essa massa refractária irá também ajudar a isolar termicamente a estrutura principal do reactor e o exterior do mesmo. A aplicação da massa refractária foi feita em três fases: a primeira aplicação serviu para fazer um primeiro contacto com o copo e a resistência, permitindo fixar esta e distribui-la uniformemente; a segunda aplicação teve o objectivo de uniformizar a massa e acabar de cobrir a resistência, com o auxílio de uma espátula; a terceira aplicação, efectuada após cerca de 3 horas da segunda aplicação, serviu então para rectificar algumas imperfeições e porosidades ainda existentes, bem como, para ajudar reforçar a concentração do calor produzido pela resistência de aquecimento. A preparação e assemblagem da resistência de aquecimento, assim como as aplicações da massa refractária, levaram cerca de 3 horas a executar, para além do que foram requeridas 48 horas de repouso adicional da massa refractária, para efeitos de secagem e de eliminação de porosidades existentes.



Por fim, foi então altura de produzir as peças em falta na constituição do reactor: as peças feitas em *Macor* que irão sustentar a membrana intermédia e que formará a câmara interna do reactor. Para tal, partiu-se de uma barra de *Macor*, com 40*mm* de diâmetro e 150*mm* de comprimento, que foi torneada a partir do seu comprimento inicial e onde foram primeiro maquinadas as fêmeas superior e inferior, onde, em primeiro lugar a barra foi furada sequencialmente até ser atingido um diâmetro interno de 32*mm*, seguido de um torneamento interior até que as peças atinjam um diâmetro interno de 35*mm*. Seguidamente, foi efectuada a rosca interior das peças, rosca essa métrica com um diâmetro de coroa de 35*mm*, um diâmetro de raiz de 36*mm* e um passo de 1*mm*, e foi efectuada também a conicidade de 5º das partes não roscadas, sendo que no fim, foram ambas sangradas e acabadas. Em seguida foi fabricado o macho superior que irá unir o anel roscado da tampa superior do reactor à fêmea superior de *M*acor. Para tal, a barra foi furada sequencialmente até ser atingido um diâmetro interno de 28*mm*, seguido de um torneamento interior até que a peça atinja um diâmetro interno de 31*mm*. Seguidamente, foi efectuado um torneamento de parte do diâmetro exterior até que este atinja um diâmetro externo de 36*mm*, seguido da roscagem do diâmetro externo não torneado (40*mm*) e do diâmetro externo torneado, obtendo assim, respectivamente, roscas com um diâmetro de coroa de 40*mm* e 36*mm*, um diâmetro de raiz de 39*mm* e 35*mm*, e um passo de 1*mm*, e efectuadas também as caixas para os o-rings, com os respectivos diâmetros: 36*mm* e 34*mm*. Foi também torneada a conicidade de 5º externa da parte não roscada desta peça. Finalmente, foi então altura de fabricar a última peça (macho inferior), em que esta foi torneada externamente até atingir um diâmetro de 36*mm* (excepto a face inferior), foi feita a rosca com 36*mm* de diâmetro de coroa e 35*mm* de diâmetro de raiz, e foram efectuadas também a caixa para o o-ring correspondente (34*mm*) e a conicidade de 5º da zona não roscada. Todo o fabrico destas quatro peças levaram cerca de 12 horas a concretizar.

Depois de todas as peças produzidas e de todos os componentes, que constituem o reactor, estarem disponíveis, foi então altura de efectuar a assemblagem de todas as partes que compõem o reactor, começando pela ligação aparafusada entre a tampa inferior e o aba inferior da zona cilíndrica da estrutura do reactor, seguido da acomodação do material isolante térmico (*Superwool 607*) junto à zona interior da zona cilíndrica do reactor, no centro da qual foi colocado o copo de vidro com o sistema de aquecimento assemblado. Sistema de aquecimento que foi ligado, através de olhais, aos pernos conectores correspondentes. Em seguida foram assemblados os restantes pernos conectores, as roscas NPT, os conectores de porta, o tê, as válvulas de entrada e saída de gás, o barómetro, o

termopar e a válvula de segurança. Por fim, foi feito o teste de assemblagem das peças de *Macor* com o anel roscado da tampa superior, a membrana intermédia e as peças *Macor* inferiores e, posteriormente, assemblada a tampa superior à restante estrutura do reactor.

Note-se, por fim, que todo o processo de fabrico, testes construtivos e montagem do reactor e dos seus componentes, levaram um total de cerca de 200 horas a concretizar e a finalizar.

B.4. Manual de Utilização e Manutenção

INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO

para o Reactor de Alta Pressão/Alta Temperatura

OMNIDEA, Lda.

Conteúdos

PREFÁCIO - 2 -

Âmbito - 2 -
Responsabilidade do Utilizador - 2 -

INSTALAÇÃO - 2 -

Limites de Pressão e Temperatura - 2 -

MONTAGEM DO REACTOR - 3 -

SISTEMA DE AQUECIMENTO - 4 -

Aquecimento - 4 -

IDENTIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS E INTERFACES - 5 -

Entradas e Saídas de Gás - 5 -
Válvula de Segurança - 5 -
Barómetro - 5 -
Termopar - 6 -
Tê - 6 -
Pernos de Ligação - 6 -

COMO UTILIZAR O REACTOR - 7 -

Primeiro - 7 -
Abrir o Reservatório - 7 -
Antes de Fechar o Reservatório - 7 -
Fechar o Reservatório - 7 -
Selar o Reservatório - 7 -
Pressurização do Reservatório - 8 -
Não Encher o Reservatório acima do Limite - 8 -
Libertar Pressão - 8 -
Teste Preliminar de Operação - 8 -

OPERAÇÃO À PROVA DE EXPLOSÃO - 8 -

Sistema de Aquecimento - 9 -
Cablagem - 9 -

TESTES DE PRESSÃO PERIÓDICOS - 9 -

NOTAS GERAIS DE MANUTENÇÃO - 9 -

Lista de Componentes do Reactor - 10 -

Prefácio

Âmbito

Estas instruções descrevem a instalação, operação e manutenção do Reactor de Alta Pressão e Alta Temperatura. Elas cobrem os passos básicos que devem ser seguidos, aquando da instalação deste reactor e descrevem a função de todos os componentes standard. O utilizador deverá ler estas instruções cuidadosamente, antes de iniciar a utilização do Reactor, para que possa que possa estar ao corrente de todas as capacidades e limitações do equipamento.

Responsabilidade do Utilizador

O Reactor de Alta Pressão e Alta Temperatura, foi projectado e produzido com altos níveis de segurança, para garantir a mesma durante a utilização do equipamento, dentro dos limites de pressão e temperatura estabelecidos.
No entanto, responsabilidade básica de segurança, aquando da utilização do equipamento, está a cargo do utilizador, que deverá:

1. **Seleccionar um reactor ou vaso de pressão** que tenha a capacidade, limite de pressão, resistência à corrosão e características que sejam compatíveis com a utilização pretendida.
2. **Instalar e operar** o equipamento, se necessário, barricado dentro de um local seguro, munido de acessórios de segurança apropriados e em conformidade com os códigos e regras de segurança em vigor.
3. **Estabelecer procedimentos de formação** para assegurar que qualquer pessoa que opere o Reactor, sabe de facto usá-lo de forma apropriada.
4. **Manter o equipamento** em boas condições e estabelecer procedimentos para testes periódicos, de forma a assegurar que o vaso permanece estruturalmente são.

Instalação

Limites de Pressão e Temperatura

Existe um compromisso a respeitar relativamente à pressão e temperatura de trabalho a que o reactor pode ser utilizado, estando este dependente do projecto para que o reactor foi concebido e dos materiais usados na sua construção.
Visto que todos os materiais perdem propriedades mecânicas, quando sujeitos a elevadas temperaturas, a pressão limite deverá ser estabelecida, consoante a temperatura utilizada no reactor. O material standard utilizado na construção do reactor é o Aço Inoxidável 316L.
Não deve ser efectuada nenhuma tentativa no sentido de aumentar os limites estabelecidos, na utilização do reactor, ou nenhuma alteração dos componentes recomendados e fornecidos com o reservatório. Deve-se também ter em conta que, os limites de pressão e temperatura deste, sofrerão alterações, caso sejam pretendidas modificações no reactor.
Os limites para o reservatório, são determinados tendo em conta as suas características físicas, sendo prescritas numa base individual.
A pressão e temperatura máximas de trabalho do reservatório, estão directamente relacionadas com o conceito do mesmo e propriedades mecânicas referentes aos material que o constitui.
Existe também uma relação directa entre a pressão de trabalho e a temperatura, visto que as propriedades mecânicas dos material que constitui o reactor, sofrem uma diminuição com o aumento de temperatura, como já foi referido.
Os limites de pressão e temperatura, dependem também das propriedades físicas das juntas e vedantes existentes no reactor, bem como, das válvulas, medidores, ou outros instrumentos existentes ligados ao reservatório. Obviamente que, a pressão de trabalho a utilizar, em segurança, em qualquer sistema, não pode ser maior do que aquela que o componente menos resistente, que compõe o reservatório, permite.

A pressão temperatura de trabalho não devem exceder os seguintes limites:

Limites de Pressão e Temperatura		
Pressão Máxima	**Temperatura Máxima**	**Observações**
100 bar (10 MPa)	200 ºC	Kit 1
-	700 ºC	Kit 2

A utilização dos Kits correspondentes, nas condições enumeradas na tabela anterior, é crucial para o bom funcionamento do reactor. A composição dos Kits será enumerada posteriormente.

Montagem do Reactor

Este reactor requer uma área de trabalho de, no mínimo, $1m^2$, numa área ventilada, com acesso conveniente a corrente eléctrica e a fornecimento e drenagem de gás.

1. Colocar todo o material numa bancada.
2. Acoplar a tampa inferior do reactor à parte tubular, com o auxílio de uma chave dinamométrica que assegure um aperto com um binário de 31.5*N.m*, por cada um dos parafusos M12x1.5 fornecidos (parafuso + 2 anilhas + porca, por cada furo).
3. Colocar o isolante térmico, a banda de aquecimento e o copo de vidro, concentricamente uns em relação aos outros, dentro do tubo do reactor. O isolante térmico fica colocado exteriormente à banda de aquecimento e ao copo de vidro, a banda de aquecimento é colocada na parte exterior do copo de vidro e este fica colocado interiormente, relativamente aos outros dois.

Assemblagem da Tampa Superior, para condições limite de pressão a 100bar e temperatura a 200ºC

4. Utilização do Kit 1: Vedantes em Viton e Anilhas de Aço.
5. Entradas e saídas de gás: Colocar as roscas *NPT* nos furos **1** e **5**, seguidas de *port connectors*, seguidos de válvulas *SS-62XPS4*.
6. Ligar as entradas e saídas de gás às válvulas.
7. Conectores, para eléctrodos, medidor de pH e sistema de aquecimento: Acoplar um perno (envolto em isolante), duas anilhas de aço, dois vedante em Viton e uma porca a cada um dos furos **2**, **3**, **6**, **7**, **8**, **10**, **11** e **12**. A cabeça do perno e o vedante deverão ficar na parte interior da tampa.
8. Barómetro e válvula de segurança: Colocar a rosca *NPT* no furo **9**, seguida de um *port connector*, seguido do *T*.
9. Ligar o barómetro e a válvula de segurança ao *T*.
10. Ligar o Termopar ao furo **4**.
11. Após efectuar as ligações respectivas dos eléctrodos e sistema de aquecimento que ficarão no interior do reactor, efectua-se a assemblagem da membrana intermédia: Fixação da membrana, com recursos aos componentes em *Macor*® e, posteriormente, assemblagem do corpo superior à tampa superior.
12. Colocação do vedante principal (Viton), na calha junto à entrada dos parafusos que unem a tampa superior ao tubo do reactor.

Assemblagem da Tampa Superior, para condições limite temperatura a 700ºC, sem pressão.

4. Utilização do Kit 2: Vedantes em Cobre e Anilhas de *Macor*®.
5. Entradas e saídas de gás: Colocar as roscas *NPT cegas* nos furos **1** e **5**.
6. Conectores, para eléctrodos, medidor de pH e sistema de aquecimento: Acoplar um perno (envolto em isolante), duas anilhas de *Macor*®, um vedante em cobre e uma porca a cada um dos furos **2**, **3**, **6**, **7**, **8**, **10**, **11** e **12**. A cabeça do perno e o vedante deverão ficar na parte interior da tampa.
7. Válvula de segurança: Colocar a rosca *NPT* no furo **9**, seguida de um *port connector*.
8. Ligar a válvula de segurança ao *port connector*.
9. Ligar o Termopar ao furo **4**.
10. Após efectuar as ligações respectivas dos eléctrodos e sistema de aquecimento que ficarão no interior do reactor, efectua-se a assemblagem da membrana intermédia: Fixação da membrana, com recursos aos componentes em *Macor*® e, posteriormente, assemblagem do corpo superior à tampa superior.

11. Colocação do vedante principal (cobre), na calha junto à entrada dos parafusos que unem a tampa superior ao tubo do reactor.

Assemblagem da tampa superior ao reactor.

12. Acoplar a tampa superior do reactor à parte tubular, com o auxílio de uma chave dinamométrica que assegure um aperto com um binário de 31.5*N.m*, por cada um dos parafusos M12x1.75 fornecidos (parafuso + 2 anilhas + porca, por cada furo **13**).

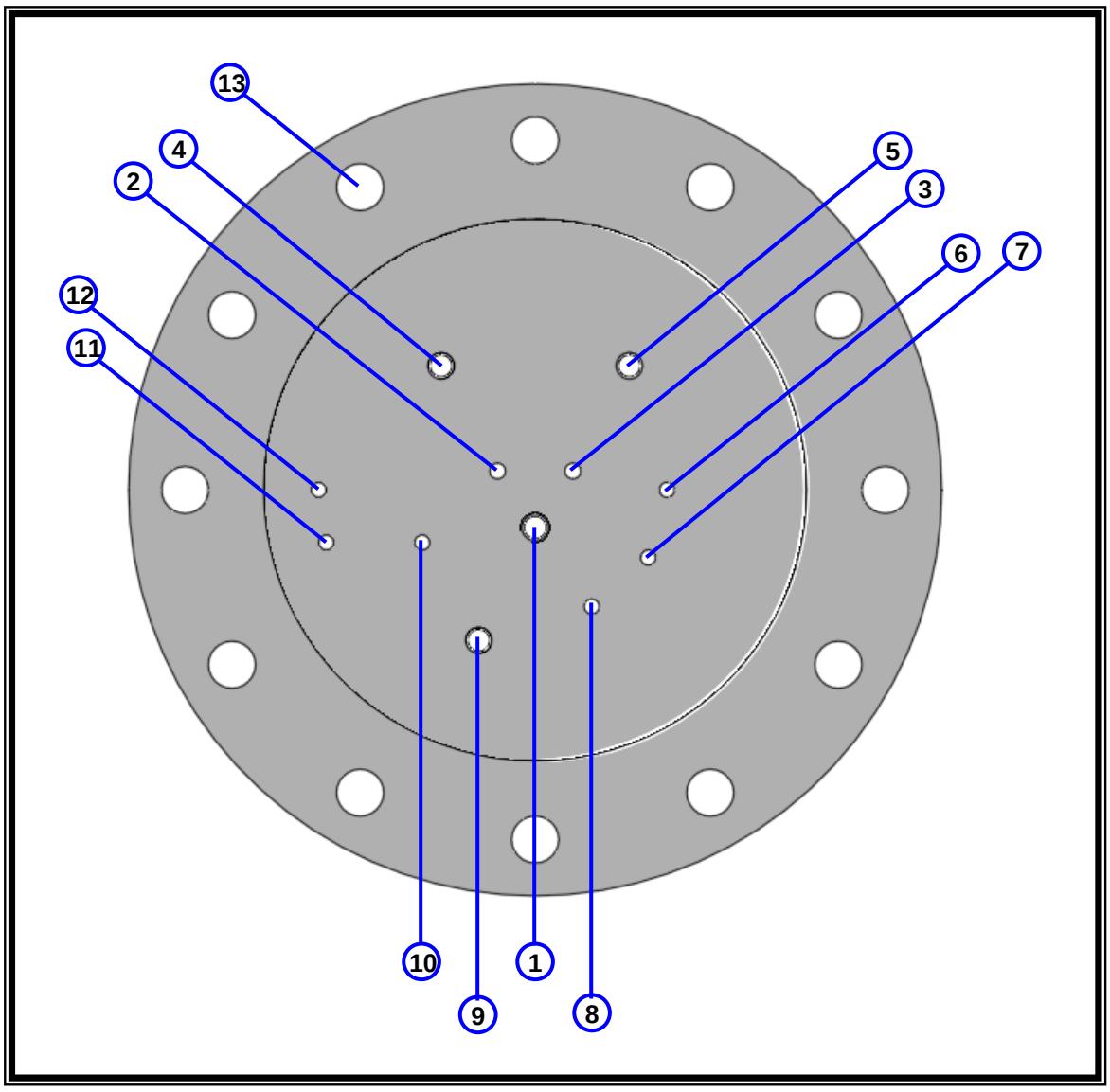


Figura – Esquematização da localização dos furos na tampa superior do reactor.

Sistema de Aquecimento

Aquecimento

constituído por uma resistência aquecimento de tungsténio com 1.5*mm* de diâmetro e cerca de 8 metros de comprimento (comprimento este, necessário para obter um aquecimento suficiente para atingir as temperaturas pretendidas), revestida por uma manga de isolamento eléctrico resistente a alta temperatura. Esta resistência foi bobinada no copo de vidro utilizado e assemblado a este com recurso a uma massa refractária comercial, massa esta que suporta temperaturas até 1500ºC. Para além de ajudar a fixar a resistência ao copo de vidro, esta massa refractária tem também o objectivo

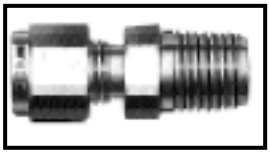
de ajudar a manter o calor emitido por efeito de Joule, da resistência, dentro do copo (e, consequentemente, dentro das câmaras do reactor).

Identificação das Válvulas e Interfaces

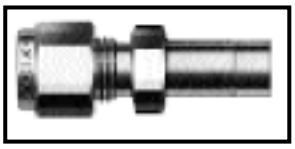
Entradas e Saídas de Gás

As entradas e saídas de gás são compostas por uma série de componentes, entre eles:

Rosca macho *NPT*



Redutor

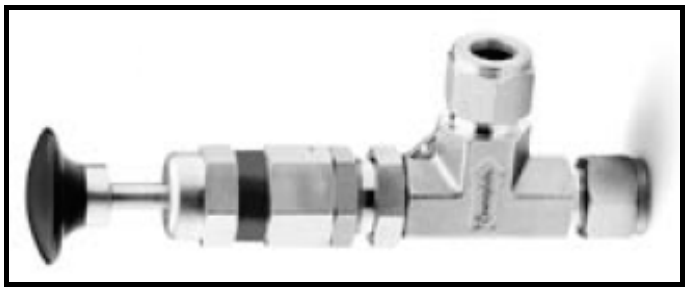


Port Connector

Válvula de 3 Vias, Bidireccional

Válvula de Segurança

A uma das saídas do *T* ligado à tampa do reactor, será ligada uma válvula de segurança, cuja pressão limite é regulável na própria válvula:



Barómetro

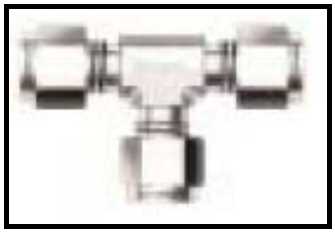
Esta é a configuração do manómetro disponível para efectuar a medição da pressão interna, no reactor:

Termopar

O dispositivo de medição da temperatura no interior do reactor, que posteriormente irá ligar a um interface de descodificação de sinal e dará, ao utilizador, a leitura da temperatura interna, é mostrado na figura seguinte:

Tê

O *T* utilizado para efectuar a ligação entre a tampa do reactor e, tanto a válvula de segurança, como o barómetro, tem a seguinte configuração:



Pernos de Ligação

Os pernos que estabelecem a ligação eléctrica com os eléctrodos no interior do reactor, assim como, alimentam o sistema de aquecimento, têm o seguinte aspecto:

Como utilizar o reactor

Primeiro

Abrir a válvula de segurança (ou as válvulas de saída de gás), de forma a libertar qualquer pressão interna existente. Desapertar os parafusos que unem a tampa superior à parte lateral do reactor, num padrão *cruzado* (desapertar sequencialmente os parafusos opostos uns aos outros), ao contrário do procedimento de aperto, gradualmente diminuindo o binário em cada parafuso.

Abrir o Reservatório

Após desapertar e retirar os parafusos indicados, a tampa, incluindo todos os acessórios a ela associados, ficará livre para ser removida do cilindro. È necessário manusear a tampa com cuidado, de forma a não provocar nenhum dano aos instrumentos e acessórios que se encontram acoplados à tampa, ou no interior do cilindro, bem como, quando a tampa se encontrar desacoplada do cilindro.

Antes de Fechar o Reservatório

Examinar todos as ligações e interfaces acoplados à tampa, para verificar se não existem danos, ou apertos mal efectuados. Examinar também cuidadosamente o vedante principal, que está localizado entre a tampa e o cilindro, para verificar se este está em boas condições. O vedante não deverá ter nenhum tipo de estrias ou cortes, nem deve ser notada uma dureza invulgar, descoloração ou deformação, no mesmo.
Examinar as superfícies de contacto entre a tampa e o cilindro, para garantir que ambas estão livres de sujidades e de rebarbas.

Fechar o Reservatório

Pegar cuidadosamente na tampa do reactor, alinhá-la com o cilindro e baixá-la cuidadosamente até encostar à flange do cilindro. Alinhar os furos de aperto da tampa com os do cilindro e, em seguida, introduzir os parafusos, anilhas e porcas.

Selar o Reservatório

Deve ser utilizada uma chave dinamométrica para efectuar o aperto nos parafusos que vão selar o reservatório. Visto que o reservatório vem com um jogo de 12 parafusos (para cada tampa) M12x1.5 (classe 12.9), o utilizador deve-se certificar que a chave dinamométrica contém o adaptador indicado aos parafusos que irá apertar.
De forma a garantir uma carga uniforme, é necessário fixar o cilindro, inspeccionar a junta e colocar a tampa em posição. Apertar cada parafuso, primeiro à mão e depois aplicando o binário de aperto necessário, recorrendo à chave dinamométrica, da seguinte forma:
Escolher um parafuso para iniciar o aperto e apertá-lo cerca de 5*N.m*. Em seguida, apertar o parafuso que estiver aproximadamente a 180º do primeiro parafuso escolhido, também cerca de 5*N.m*. Em seguida, os parafusos que estiverem a cerca de 90º dos primeiros dois, e assim sucessivamente. Repetir este padrão, e apertar os parafusos até cerca de 8*N.m* e, posteriormente, até ao binário de aperto desejado, 10*N.m*.

Pressurização do Reservatório

Verificar todas as válvulas cuidadosamente antes de efectuar qualquer transferência de gás para dentro do reservatório. As válvulas de saída de gás e de segurança devem também estar fechadas, a não ser que se queira purgar o ar interior, ou que se pretenda estabelecer um sistema contínuo. Certificar-se sempre que a pressão de gás no tanque de fornecimento, é sempre superior à pressão do gás no reactor, caso contrário, será forçada a saída de líquido para o tanque de fornecimento, quando a válvula de entrada estiver aberta. Se existir qualquer possibilidade de não haver uma pressão suficientemente alta no tanque de fornecimento, é aconselhável instalar-se uma válvula de controlo de caudal unidireccional (opcional), para prevenir caudal no sentido inverso. Com a válvula de entrada de gás aberta, abrir a válvula de saída do tanque de fornecimento apenas cerca de um quarto de volta e depois utilizar a válvula de um barómetro para controlar o caudal de gás que entra no reactor. Após ser atingida a pressão pretendida, dentro do reservatório, fechar as válvulas do tanque de fornecimento e as válvulas de entrada do reactor e desacoplar o mangueira de ligação entre as válvulas.

Não Encher o Reservatório acima do Limite

Verificar continuamente e cuidadosamente o barómetro, durante a admissão de gás, de forma a garantir que não é excedido o limite máximo de pressão no reactor. Ter em conta que, qualquer aumento subsequente da temperatura interna, vai provocar um aumento de pressão. Para além disso, certificar-se que a quantidade de líquido dentro do reactor é adequada. Em regra, a quantidade de líquido, não deve exceder dois terços da capacidade do reactor. Demasiado líquido dentro do reactor, pode provocar o desenvolvimento de tensões perigosas, se não houver espaço suficiente para expansão, quando o líquido for aquecido.

Libertar Pressão

Utilizar a(s) válvula(s) de saída de gás, para reduzir a pressão interna, caso o reactor tenha sido acidentalmente sobrecarregado, durante o enchimento. Utilizar a mesma válvula para libertar também qualquer excesso de pressão, durante o seu funcionamento, e para despressurizar o reactor no final da sua utilização. Se os gases a descarregar forem inflamáveis ou tóxicos, é necessário purgar o reactor num exaustor apropriado ou noutro ponto onde a libertação desse tipo de gases seja segura.

Teste Preliminar de Operação

É fundamental ler cuidadosamente todas as instruções de operação, assim como a sua assimilação com os procedimentos correctos de utilização do reactor, operação de controlos e outros acessórios. Deverá efectuar-se um teste preliminar de operação, apenas com água, de forma a verificar a integridade do reactor, antes de começar a efectuar ensaios experimentais. Neste teste preliminar, é necessário encher o reservatório, até cerca de metade da sua capacidade, com água e aquecê-la até cerca de 150ºC, enquanto se inspecciona todo o aparato a nível de fugas e observando o comportamento do controlo de temperatura.

Operação à Prova de Explosão

Se o código de segurança em vigor, impuser que o equipamento instalado no laboratório do utilizador, seja à prova de explosão, existem dois possíveis pontos de ignição a serem considerados:

Sistema de Aquecimento

Os elementos do sistema de aquecimento poderão ser perigosos numa atmosfera explosiva, caso a temperatura do elemento chegue a ser suficientemente elevada para dar origem à ignição de vapores inflamáveis. O risco associado, deve ser avaliado para cada instalação, visto que são necessárias grandes alterações, caso o sistema de aquecimento tenha que ser isolado da atmosfera envolvente. Os utilizadores que considerem este um risco significativo, deverão contactar o fabricante por forma a discutirem sobre uma solução adequada para este problema.

Cablagem

A cablagem fornecida com o reactor, não vai de encontro às normas relativas a operações à prova de explosão.

Testes de Pressão Periódicos

O reactor sofreu um teste a uma pressão 1.5 vezes superior à pressão máxima permitida. Foram registadas medições com uma precisão micrométrica, durante este teste, por forma a observar a deformação das paredes do reactor sob pressão. Uma deformação acima do limite ou o colapso do material, aquando da aplicação de uma pressão igual à referida acima, indicariam que o reservatório é potencialmente inseguro e seria rejeitado. Testes semelhantes a este deverão ser efectuados, em intervalos regulares, durante o uso do reactor e, particularmente, sempre que o utilizador suspeitar que o equipamento foi sobrecarregado ou que sofreu algum tipo de dano.
Alguns laboratórios têm infra-estruturas para testes hidráulicos e têm por regra testar com regularidade os reservatórios de pressão, São arquivados os registos de vários testes feitos a cada reservatório, de forma a comparar resultados entre os testes feitos e verificar se existem dados díspares que possam alertar para algum defeito no reservatório. Qualquer reservatório que não retome as suas dimensões inicias, após o teste hidrostático, não deverá ser considerado seguro e deverá ser rejeitado para continuar em funcionamento.
Utilizadores que não possuam infra-estruturas para efectuar o teste hidrostático, deverão recorrer a outras entidades que tenham capacidade para o fazer. O teste deverá ser feito, sempre que o material mostre danos excessivos devido a corrosão, ou sempre que uma sobrecarga ou outras ocorrências não usuais tenham tido lugar e levantem questões sobre a segurança do reactor.

Notas Gerais de Manutenção

1. Inspeccionar periodicamente a corrosão excessiva, existente em toda a cablagem eléctrica acessórios de pressão. Partes que apresentem corrosão excessiva deverão ser substituídas imediatamente por componentes iguais.
2. Utilizar sempre ferramentas apropriadas em todas as ligações e válvulas. Nunca utilizar alicates ou chaves de tubos.
3. Para reinstalar componentes na tampa superior, aparafusar os aparelhos de medida ou válvulas firmemente no adaptador correspondente. Estas ligações podem ser efectuadas e desacopladas repetidamente, sem destruir as superfícies de vedação. Uma fina película de lubrificante para roscas, como um lubrificante de alta temperatura que previna a fusão entre as roscas, ajuda a obter uma junta apertada. Nota: neste tipo de juntas de roscas direitas, não se deve usar fita PTFE.
4. Roscas NPT (National Pipe Taper - roscas cónicas) não deverão ser desacopladas da tampa mais do que o necessário. Vai-se tornando cada vez mais difícil, manter uma vedação apertada, com este tipo de roscas, caso a ligação seja feita e desfeita repetidamente. Deve ser usada fita PTFE em todas as roscas PTFE.
5. Não utilizar lubrificante anti-aderente ou óleo nas roscas ou ligações, se for utilizado oxigénio no reservatório.

6. Assegurar-se que o vedante principal do reservatório está colocado correctamente na calha correspondente. Assim como os vedantes correspondentes a ligações da tampa superior.
7. Limpar a fundo todas as roscas e passagens de gás, e remover todos os fragmentos de fita, quando for feita a manutenção ao reservatório. Um banho ultra-sónico é excelente para limpar as partes metálicas, contudo, o termopar, o manómetro de pressão e os vedantes, não devem ser sujeitos a esse banho ultra-sónico. Todas as fontes de alimentação deverão estar desligadas quando se efectua uma limpeza.
8. Inspeccionar periodicamente os parafusos de montagem, que unem as tampas superior e inferior ao cilindro, para lubrificação e limpeza.

Lista de Componentes do Reactor

Estrutura Externa do Reactor

1. Tampa Inferior (faces direitas)
2. Cilindro
3. Tampa Superior (face direita interior + face com saliência exterior)

Componentes Internos

4. Manta Refractária (isolante térmico)
5. Sistema de Aquecimento
6. Recipiente de Vidro
7. Sistema *Macor*® de Fixação da Membrana Interna, Inferior/Interior (macho com topo)
8. Sistema *Macor*® de Fixação da Membrana Interna (fêmea) – 2 unidades
9. Sistema *Macor*® de Fixação da Membrana Interna, Superior/Interior (macho sem topo)

Sistemas de Medição

10. Manómetro de Pressão de 63*mm* 0-250*bar* ¼" (Swagelok – PGI-63B-BG250-LAQX)
11. Termopar tipo *J* (personalizado)

Ligações

12. Rosca Macho NPT 1/16" - ¼" (Swagelok – Ref.ª SS-100-1-4) – 3 unidades
13. Porta de Ligação ¼" (Swagelok – Ref.ª SS-401-PC) – 4 unidades
14. Válvula de Bola de 3 Vias, Bidireccional ¼" (Swagelok – Ref.ª SS-62XPS4) – 2 unidades
15. Tê Fêmea ¼" O.D. x ¼" NPTF
16. Válvula de Alívio Ajustável de Alta Pressão ¼" (Swagelok – Ref.ª SS-4R3A)
17. Mola para Válvula de Alívio 100-155*bar* ¼" O.D. (Swagelok – Ref.ª 177-R3A-K1-D – Laranja)
18. Tampão para Porta Swagelok ¼" O.D. (Swagelok – Ref.ª SS-400-P) – 4 unidades
19. Perno para Ligação Eléctrica (isolados) – 8 unidades
20. Anilha de Aço M4 para Perno de Ligação – 16 unidades
21. Anilha de *Macor*® M4 para Perno de Ligação – 16 unidades
22. Porca M4 para Perno de Ligação – 8 unidades
23. Parafuso M12x1.75, classe 12.9, Aço – 24 unidades
24. Parafuso M12x1.75, classe A4, Aço Inoxidável – 24 unidades
25. Anilha M12, Aço – 48 unidades
26. Anilha M12, Aço Inoxidável – 48 unidades
27. Porca M12x1.75, classe 12.9, Aço – 24 unidades
28. Porca M12x1.75, classe A4, Aço Inoxidável – 24 unidades

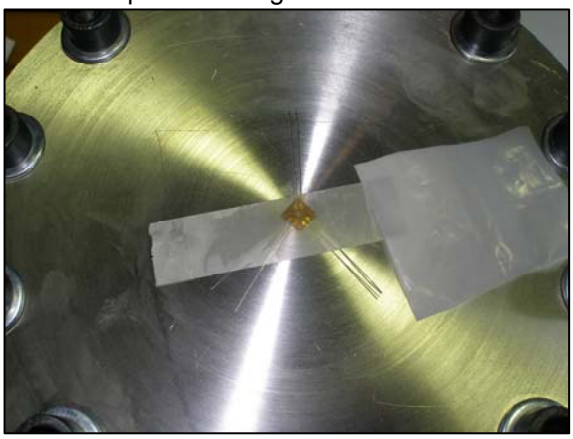
Vedantes

29. O-Ring em Viton I.D. 3x2*mm* (pernos de ligação) – 16 unidades
30. O-Ring em Cobre I.D. 3x2*mm* (pernos de ligação) – 16 unidades
31. O-Ring em Viton I.D. 3x1*mm* (pernos de ligação) – 16 unidades
32. O-Ring em Cobre I.D. 3x1*mm* (pernos de ligação) – 16 unidades
33. O-Ring em Viton I.D. 38*mm* (ligação *Macor*®/Tampa)
34. O-Ring em Cobre I.D. 38*mm* (ligação *Macor*®/Tampa)
35. O-Ring em Viton I.D. 34*mm* (ligação *Macor*®/ *Macor*®) – 2 unidades
36. O-Ring em Cobre I.D. 34*mm* (ligação *Macor*®/ *Macor*®) – 2 unidades
37. O-Ring em Viton I.D. 133*mm* (ligação Tampa/Cilindro) – 2 unidades
38. O-Ring em Cobre I.D. 133*mm* (ligação Tampa/Cilindro) – 2 unidades

C. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais iniciaram-se com o processo de aplicação dos extensómetros na estrutura externa do reactor. Para tal, foram seguidas as instruções dadas pelo fabricante (HBM):

- Limpeza das superfícies onde serão aplicados os extensómetros, com recurso a uma solução à base de acetona, de forma a retirar todas as impurezas e gorduras eventualmente existentes nas referidas superfícies.
- Especificação da localização exacta onde os extensómetros deverão ser aplicados.
- Com recurso a fita-cola transparente, aplicá-la na superfície superior dos extensómetros e, por sua vez, aplicar os extensómetros preliminarmente nas localizações pretendidas.



- Antes de ligar os extensómetros à estrutura do reactor, através do adesivo fornecido, deve-se preparar o próprio adesivo, sendo este um adesivo à base de uma resina epoxy, constituída por dois componentes que deverão ser misturados, distribuídos pelos 5 recipientes de armazenamento e aplicação, e armazenamentos dos recipientes num ambiente frio (se armazenado a +2ºC a durabilidade do adesivo ronda os 6 meses, se armazenado a -32ºC a durabilidade do adesivo ronda os 12 meses).
- Após a preparação do adesivo, é então altura de efectuar a sua aplicação e, assim, ligar convenientemente os extensómetros à estrutura do reactor.
- Aguardar pela cura do adesivo (cerca de 8 horas) e pela consistente ligação dos extensómetros.

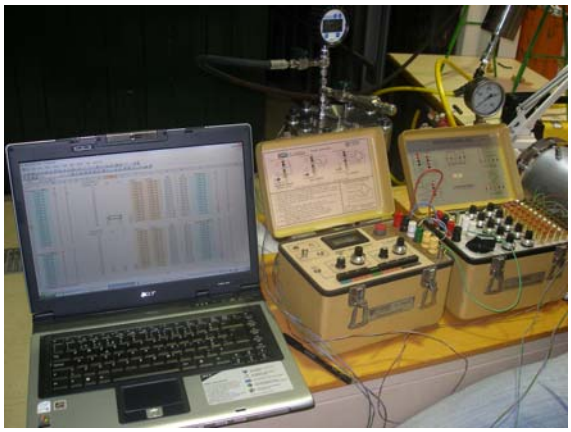
Seguidamente, a preparação dos ensaios passa pela soldadura dos pernos das grelhas de medição dos extensómetros, aos fios de transmissão que ligam e formam as pontes de Wheatstone. Pontes essas que são ligadas aos aparelhos de aquisição e conversão de dados, que possibilitam ler e conferir as micro-deformações medidas pelos extensómetros.

Após a fase de preparação relativamente à extensometria, é então altura de assemblar os componentes necessários aos ensaios:

- Válvula de entrada, na rosca NPT 1/16” e entrada de gás ligada à válvula – Gás utilizado: Argon.
- Sonda térmica, na rosca NPT 1/8”, sendo que esta foi ligada a um equipamento de aquisição de dados térmicos, para possibilitar a leitura da temperatura interior.
- Manómetro de pressão, na rosca NPT 1/16”.

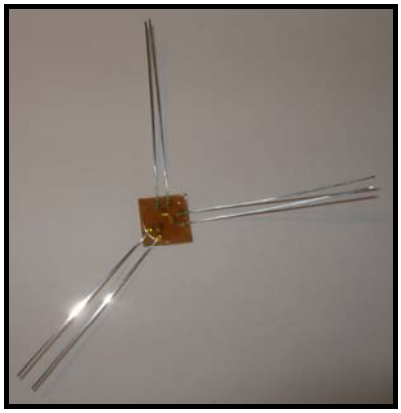
- Alimentação eléctrica, aos pernos conectores, ligados ao sistema de aquecimento, no interior do reservatório. Fonte de tensão variável, para permitir ajustar a temperatura interna no vaso de pressão.

Após a assemblagem dos componentes acima descriminados, é agora possível realizar os ensaios laboratoriais, em que, inicialmente, o sistema de aquecimento foi alimentado até que o interior do reactor atingisse os 200ºC e estabilizasse convenientemente essa temperatura. Seguidamente, foi forçada a entrada e saída de gás, de forma a efectuar os ensaios pretendidos (4 ensaios a 100bar de pressão interna, seguidos de 1 ensaio a 150bar, seguido de mais 4 ensaios a 100 bar de pressão interna) e fazer a leitura dos resultados dados pelos extensómetros.



Findos os ensaios, são então desassemblados os componentes do reactor (entrada de gás, válvula de entrada, sonda térmica, manómetro de pressão e alimentação eléctrica), após o arrefecimento da estrutura e, posteriormente, desacoplados os extensómetros da estrutura principal e todos os componentes a eles ligados.

As especificações dos extensómetros utilizados, estão descritas em seguida:



Dehnungsmeßstreifen
Strain Gauges
Jauges d'extensométrie

Typ
US-Type 4/350RC11

Stückzahl / Quantity / Quantité: 5

mit / with / avec [ ] ohne / without / sans [X] Applikationshilfe / Application aid / Support d'aide à l'application

Widerstand / Resistance / Résistance	350 [Ω]	+ 0,35 [%] / - 0,35 [%]	
k-Faktor / Gauge factor / Facteur k	1,95	± 1 [%]	
Querempfindlichkeit / Transverse Sensitivity / Sensibilité transverse		0,4 [%]	
		-- [%]	

Temperaturkoeffizient des k-Faktors / Temperature coefficient of gauge factor / Coefficient de température du facteur k: keine Angabe

Artikel Nr. / Part No. / No. de Réf.: 1-RC11-4/350

Folienlos / Lot / Lot de la feuille: A508/05/03

Herstellungslos / Batch / Lot de fabrication: 812004506

Temperaturkompensation: Angepaßt für / Temperature Compensation: Compensated for / Compensation de température: Compensation pour

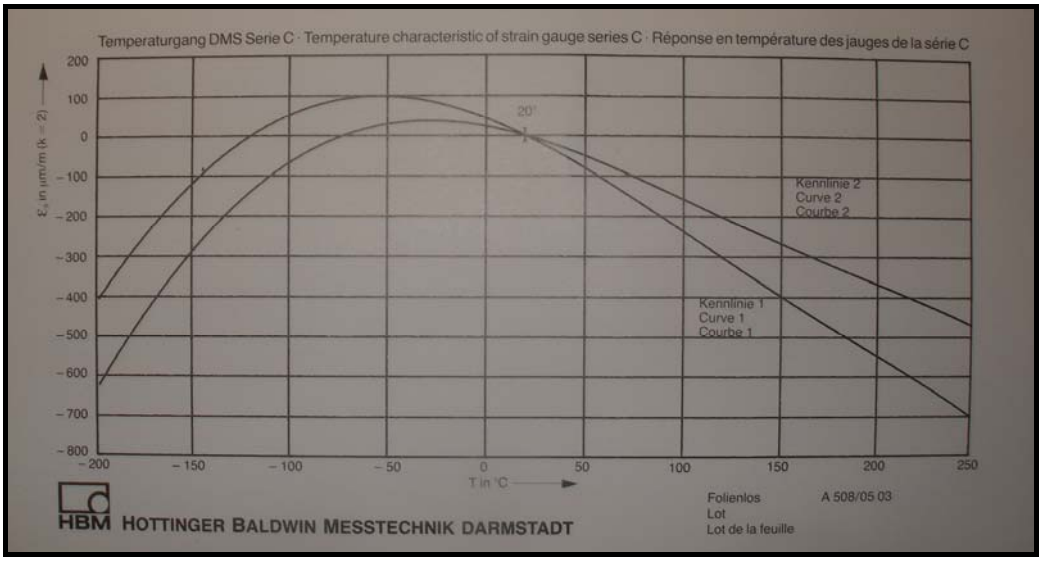
α = 10.8 [10^{-6}/ °C]

[X] Stahl / Steel / Acier [ ] Aluminium [ ] Sonstige / Other / Autre

Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an.

All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number.

Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de la tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.



Charakteristischer Temperaturgang der Dehnungsmeßstreifen **Serie C** bei Applikation auf einen Werkstoff mit linearem Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha = 10{,}8 \cdot 10^{-6}$/K.

Kennlinie 1:
Temperaturgang der DMS ohne Anschlußbändchen:

$$\varepsilon_s(T) = 43{,}7 - 1{,}92 \cdot T - 1{,}39 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 4{,}97 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1{,}80 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2{,}51 \cdot 10^{-10} \cdot T^5$$

Kennlinie 2:
Temperaturgang der DMS mit Anschlußbändchen (30 mm einfache Bändchenlänge).
Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen den Kennlinien 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge zu errechnen. Bei gekürzten Bändchen gilt:

$$\varepsilon_s(T) = 43{,}7 - 1{,}92 \cdot T - 1{,}39 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 4{,}97 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1{,}80 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2{,}51 \cdot 10^{-10} \cdot T^5 + 3{,}3 \cdot 10^{-2} \cdot L\,(T - 20)\ \mu m/m$$

(T = Temperatur in °C; L = einfache Bändchenlänge in mm).
Die Kennlinien 1 und 2 geben die mittlere Temperaturgangkurve wieder. Die Streuung beträgt ± 0,3 µm/m/K bei Zugrundelegung einer Standardabweichung von ± 1 s.

Typical temperature characteristic of a **series C** strain gauge when bonded to a material with a linear coefficient of thermal expansion $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6}$/K.

Curve 1:
Temperature characteristic of gauges without connecting strips:

$$\varepsilon_s(T) = 43.7 - 1.92 \cdot T - 1.39 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 4.97 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1.80 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2.51 \cdot 10^{-10} \cdot T^5$$

Curve 2:
Temperature characteristic of gauges with connecting strips (each strip 30 mm long):
With shortened strips the temperature characteristic lies between curves 1 and 2. The numerical representation enables the temperature characteristic to be calculated for any length of strip. The following applies for a shortened strip:

$$\varepsilon_s(T) = 43.7 - 1.92 \cdot T - 1.39 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 4.97 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1.80 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2.51 \cdot 10^{-10} \cdot T^5 + 3.3 \cdot 10^{-2} \cdot L\,(T - 20)\ \mu m/m$$

(T = temperature in °C; L = length of single strip in mm).
Curves 1 and 2 show the average temperature characteristic. The spread is ± 0.3 µm/m/K based on a standard deviation of ± 1 s.

Réponse caractéristique en température d'une jauge d'extensométrie de la **série C** appliquée sur un matériau dont le coefficient linéaire de température est $\alpha = 10{,}8 \cdot 10^{-6}$/K.

Courbe 1:
Réponse en température de la jauge sans pattes de sortie:

$$\varepsilon_s(T) = 43{,}7 - 1{,}92 \cdot T - 1{,}39 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 4{,}97 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1{,}80 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2{,}51 \cdot 10^{-10} \cdot T^5$$

Courbe 2:
Réponse en température de la jauge avec pattes de sortie (pattes simples de 30 mm de longueur).
Pour des pattes de sortie plus courtes, la réponse en température se trouve entre les courbes 1 et 2. Il est possible de calculer la réponse en température pour des longueurs plus courtes. On appliquera alors la relation:

$$\varepsilon_s(T) = 43{,}7 - 1{,}92 \cdot T - 1{,}39 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 4{,}97 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1{,}80 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2{,}51 \cdot 10^{-10} \cdot T^5 + 3{,}3 \cdot 10^{-2} \cdot L\,(T - 20)\ \mu m/m$$

(T = température en °C; L = longueur de la patte en mm).
Les courbes 1 et 2 reproduisent des réponses moyennes de température. La dispersion est de ± 0,3 µm/m/K en prenant pour hypothèse un écart standard de ± 1 s.